



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Jefim Birjuk

**ÜHE JA KAHE PÖÖRAMISTELJEGA PV-PANEELIDE
ASENDI MUUTMISE JUHTIMISSÜSTEEMIDE TÖÖ
TULEMUSTE VÕRDLUS**

COMPARISON RESULTS OF ONE AND TWO AXIS
ROTATIONAL POSITIONING DRIVING SYSTEMS

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: Külalisõppejõud Veli Palge, *DrSc*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Jefim Birjuk		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Ühe ja kahe pööramisteljega PV-paneelide asendi muutmise juhtimissüsteemide töö tulemuste võrdlus			
Lehekülgi: 76	Jooniseid: 17	Tabeleid: 10	Lisasid: 15
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika			
4.17. Energeetikaalased uuringud			
T140 Energeetika			
Juhendaja: Veli Palge			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool 2019			
<p>Päikese energia on taastuvenergiaallikatest kõige võimsam ning tänapäeval selle kasutusvõimalused on suure tähelepanu all tänu päikesekiirgust muundavate tehnoloogiate arenemisega. Vaadeldava töö eesmärgiks on kahe, erineval viisil asendi muutmisevõimalusega PV-paneeli juhtimissüsteemi loomine. Üks juhtimissüsteem muudab asendit vaid asimuudi järgi ja teine muudab asendit lisaks ka Päikese kõrguse järgi. Päikese asendit järgivate paneelide kasutamisel suureneb selle efektiivsus.</p> <p>Töös on kirjeldatud konstruktsiooni iseärasusi, konstruktsiooniosade testimise tulemusi, juhtimisseadet ja selle juhtprogrammi. Samuti on kirjeldatud juhtimissüsteemide testimise tulemusi erinevatel ilmastikutingimustel ja esitatud juhtimissüsteemide töö tulemuste võrdlused saadud mõõtmistulemuste alusel. Esimesed katsetulemuste alusel saab järeldada, et kaheteljelise juhtimissüsteemi eelised avaldusid eriti madala Päikese kõrguse korral. Testimise tulemuste alusel sai määrata juhtimissüsteemi täiustamise järgmised etapid.</p>			
Märksõnad: PV-paneel, juhtimissüsteem, kiirgusenergia, otsene kiirgus,			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Jefim Birjuk		Curriculum: Energy Application Engineering	
Title: Comparison Results of One and Two Axis Rotational Positioning Driving Systems			
Pages: 76	Figures: 17	Tables: 10	Appendixes: 15
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research T140 Energy Research Supervisors: Veli Palge Place and date: Estonian University of Life Sciences 2019			
<p>Solar energy is the most powerful source of renewable energy, and nowadays it's highly topical due to the development of absorbing solar radiation technologies.</p> <p>The aim of the Master's thesis is to design two solar panel driving systems with different rotation methods. One panel changes position according to azimuth and the position of the second-panel changes according to the azimuth and the altitude of the sun. Driving systems, that follows the position of the Sun have a positive effect on the Solar panel efficiency.</p> <p>Thesis described driving system design features, structural component testing results, and programming. Furthermore, the thesis contains the testing of the driving systems under different climatic conditions and a comparison of the results. Based on the first test results, it can be concluded that the advantages of the two-axis control system were particularly pronounced in the case of low sun height. In conclusion of the first test results could be defined the next phases of the driving system development.</p>			
Keywords: Solar Panel, Driving System, Solar Radiation, Direct Radiation			

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID	6
SISSEJUHATUS	8
1. PÄIKESEKIIRGUS	9
1.1. Päikese kiirguse iseloomustus	9
1.2. Päikeseenergeetika	13
1.2.1. Päikesepaneelid	14
1.2.2. Päikesekollektor	15
1.3. Süsteemide võrdlus	17
2. PANEELIDE JUHTIMISSÜSTEEMID	20
2.1. Süsteemi juhtimise eesmärk	20
2.2. Süsteemi juhtimise tööpõhimõte	23
2.3. Juhtimissüsteemi valmistamine	25
2.4. Programmi koodi kirjutamine	34
3. JUHTIMISSÜSTEEMI KATSETAMINE	37
3.1. Katsetendi kokkupanemine ning esmane katsetus	37
3.2. Põhikatsed	40
3.3. Tulemused ja arutelu	43
KOKKUVÕTTE	47
KASUTATUD KIRJANDUS	49
LISAD	52
Lisa 1a. Maailma otsese kiirguse kaart [3]	53
Lisa 1b. Maailma summaarse kiirguse kaart [3]	54
Lisa 2a. Eesti otsese kiirguse kaart [3]	55
Lisa 2b. Eesti summaarse kiirguse kaart [3]	56
Lisa 3. Päikese kiirguse keskmised aastasummad Eestis (Tõravere) [1].	57
Lisa 4. Päikesepaneel Velleman SOL10P	59

Lisa 5. Juhtimissüsteemi talitlusalgoritmi plokkskeem	60
Lisa 6. Juhtimissüsteemi elektriline skeem	61
Lisa 7a. Üheteljelise paneeli kinnitus	62
Lisa 7b. Kaheteljelise paneeli kinnitus	63
Lisa 8. Juhtimissüsteemi katsestend	64
Lisa 9. Juhtimissüsteemi programm	65
Lisa 10. Esmase katse vaade	71
Lisa 11. Fototakistite katseandmed	72
Lisa 12. Katse 1 tulemused.....	73
Lisa 13. Katse 2 tulemused.....	74
Lisa 14. Katse 3 tulemused.....	75
Lisa 15. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	76

TÄHISED JA LÜHENDID

A_Q	– albeedo, %
D	– päikese hajus kiirgus, W/m^2
E	– kiiritustihedus, kW/m^2
E_p	– paneelist väljastatav energia, $\text{W}\cdot\text{s}$
E_{pa}	– paneeli abil maksimaalne saadud energia aastas ($\eta_p = 20\%$), $\text{kW}\cdot\text{h}$
E_{pp}	– paneeli abil keskmine saadud energia päevas Eestis ($\eta_p = 20\%$), $\text{kW}\cdot\text{h}$
h_0	– päikese kõrgus, $^\circ$
i_{max}	– integer muutuja maksimaalne väärtus Arduinol
I	– paneeli vool, A
k	– pingejaguri koefitsient
K	– kollektori tüübist ja tema isolatsioonist sõltuv tegur
l_{ap}	– päikesepaneeli absorbeeriva pinna laius, mm
n	– katse mõõtmiste arv
p_{ap}	– päikesepaneeli absorbeeriva pinna pikkus, mm
P	– paneeli võimsus, W
Q	– päikese summaarne kiirgus, W/m^2
$Q_{(S)^\circ}$	– maksimaalne aastane kiirgusenergia päikesekiirtega risti pinnal Eestis, $\text{kW}\cdot\text{h/m}^2$
R	– paneeli ahelasse lisatud takistus, Ω
R_1, R_2	– paneeli ahelasse lisatud takistused pinge jagamiseks, Ω
R_Q	– peegeldunud kiirgus, W/m^2
S	– päikese otsene kiirgus, W/m^2
S_0	– solaarkonstant, kW/m^2
S'	– horisontaalsele pinnale langev otsene kiirgus, W/m^2
S_{ap}	– päikesepaneeli absorbeeriva pinna pindala, m^2
U	– paneeli pinge, V
U_i	– mõõtmise pingeväärtus, V
U_k	– pingeväärtuste aritmeetiline keskmine, V
U_s	– sisendpinge, V
U_v	– väljundpinge, V

U_{α}	– paneelide klemmidel arenev pinge langemisnurka α korral, V
U_1	– katse esimese mõõtmise pingeväärtus, V
U_2	– katse viimase mõõtmise pingeväärtus, V
Z_0	– Päikese seniitkaugus, °
ΔU	– pinge mõõtmise samm, V
Δt	– mõõtmiste salvestamise samm, s
ΔT	– soojuskandja ja välistemperatuuri vahe
α	– päikese kiirte langemisnurk, °
η	– päikese paneeli arvutuslik kasutegur
η_0	– päikese paneeli nimikasutegur, kui $\Delta T=0$
η_p	– kaasaegsete PV-paneelide maksimaalne kasutegur, %
σ	– mõõteseria standarthälve, V

SISSEJUHATUS

Päikese energia on kõige võimsam taastuvenergiaallikatest ning tänapäeval selle kasutusvõimalused on suure aktuaalsusega tänu päikesekiirguse neelduva tehnoloogiate arenemisega. Päikesekiirgust alamliigid on: otsene kiirgus, hajus kiirgus ja peegeldunud kiirgus. Horisontaalse, ehk vaadeldava töö kontekstis maapinna kiirgustingimused ja päikesekiirtega risti oleva pinna kiirgustingimused on erinevad kuna päikesekiirte langemise nurk vastuvõtja pinnale mõjutab kiiritustihedust ja kiirte peegeldumist. Tulenevalt sellest, päikeseenergia neelduva pinna pööramine sünkroonselt päikeseasendiga suurendab pinna kiiritustihedust.

Vaadeldava töö eesmärgiks on kahe, erineval viisil asendi muutmisevõimalusega PV-paneeli juhtimissüsteemi loomine. Selleks oli vaja:

- kujundada konstruktsioonid, kus ühte paneeli saab pöörata ühe telje ümber ja teist kahe telje ümber;
- koostada kirjeldatud konstruktsioonidele elektrilised juhtimissüsteemid;
- kirjutada nendele süsteemidele juhtprogrammi koodid.

Seadme valmistamisel tehti süsteemi erinevate osade töövõime määramise kontrollkatseid ja peale valmimist mõõtmisi erinevate pilvituste ja Päikese asendite korral juhtimissüsteemide töövõime kontrollimiseks. Viimaste katsete alusel sai võrrelda ühe ja kahe pööramisteljega juhtimissüsteemide töö tulemusi ja teha esialgseid järeldusi.

Autor on tänulik külalisõppejõud Veli Palgele, kes töö valmimisele kaasa aitas.

1. PÄIKESEKIIRGUS

1.1. Päikese kiirguse iseloomustus

„Peaaegu kõik Maa atmosfääri füüsikalised protsessid ja nähtused tekivad ja kulgevad Päikese energia arvel. Päikeseenergia saabub maa peale kiirguse teel. Ka elu on Maal võimalik ainult tänu päikesekiirgusele. Päikeseenergia mõjutab Maa atmosfääris ilma. Lisaks käivitab ta meie planeedil ka unikaalse nähtuse — elu. Tänu fotosünteesile elavad taimed, tänu taimedele saavad toitu loomad ja inimene“ [1].

„Peale Päikese saab atmosfäär energiat Maa sisemusest soojuse, tähtedelt valguse ja maailmaruumist kosmilise kiirguse näol. Viimaste osatähtsus on atmosfääri energiabilansis aga niivõrd väike, et nendega ei tule praktiliselt arvestada. Võib märkida, et meie geograafilisel laiusel saadakse maa seest aasta jooksul umbes sama palju energiat (ligikaudu $0,64 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$) kui saame suvisel keskpäeval ühe tunni jooksul päikesekiirgusest“ [1].

Teisisõnu, Päikeselt saabub maapinnale nii palju energiat, et kui edasi arendada päikeseenergia muundamisviise, võib päikeseenergia arvel rahuldada kogu inimkonna energiavajaduse.

Päikese füüsilised parameetrid on järgmised [1, lk. 14]:

- Mass $1,99\cdot 10^{30} \text{ kg}$
- Raadius $6,96\cdot 10^5 \text{ km}$
- Fotosfääri temperatuur $5800 \text{ }^\circ\text{K}$
- Temperatuur tsentris $15\cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$
- Kiirgusvõimsus $3,86\cdot 10^{26} \text{ W}$
- Keskmine kaugus maast $1,5\cdot 10^8 \text{ km}$.

„Aktinomeetrias tavaliselt käsitletakse kiirgusbilanssi horisontaalsel pinnal, mis ligikaudu vastab lausikule maapinnale. Horisontaalse pinna kiirgustingimuse kujundavad nii sinna langevad kui ka sealt lahkuvad kiirgusvood. Olenevalt kiirgusvoogude lainepikkuste vahemikust jaotatakse nad lühi- ja pikalainelisteks. Kiirgust loetakse lühilaineliseks, kui ta

mahub lainepikkuste vahemikku $\lambda = 0,2 - 4,0 \text{ } \mu\text{m}$. Spektraalpiirkonda lainepikkuste vahemikus $\lambda = 4 \dots 100 \text{ } \mu\text{m}$ nimetatakse pikalaineliseks. Päikesekiirgus on lühilaineline kiirgus (ca 99% sellest jääb spektraalpiirkonda $\lambda < 4 \text{ } \mu\text{m}$), atmosfääri ja aluspinna soojuskiirgus kuuluvad pikalainelise kiirguse hulka. Pinnale langevaid kiirgusi loetakse positiivseks, lahkuvaid negatiivseks“ [1].

„Päikesekiirguse keskmist vootihedust kiirtega risti pinnal atmosfääri ülalpiiril nimetatakse solaarkonstandiks ja tähistatakse S_0 . Tema väärtus on $1,367 \text{ kW/m}^2$. Maapinnani jõudmiseks tuleb päikesekiirgusel läbida atmosfäär. Teel läbi atmosfääri päikesekiirgus nõrgeneb. Nii kiirguse hajumine kui ka neeldumine olenevad kiirguse lainepikkusest“ [1].

Aktiomeetrias horisontaalpinna kiirguskliima analüüsil eristatakse:

- otsest päikesekiirgust;
- ülalt langevat hajusat kiirgust;
- pinnalt hajusalt peegeldunud päikesekiirgust;

„Päikese otsene kiirgus on see osa kiirgusest, mis jõuab päikeseketta suunast maapinnale praktiliselt paralleelsete kiirte kimbuna. Seda mõõdetakse tavaliselt kiirtega risti pinnal ja tähistatakse S . Horisontaalpinna tingimuste seisukohalt on oluline teada horisontaalsele pinnale langeva otsese kiirguse (S') väärtust. Seda arvutatakse seosest“: [1]

$$S' = S \cdot \sin h_0 \quad (1.1)$$

kus S' on horisontaalsele pinnale langev otsene kiirgus, W/m^2 ;

S – Päikese otsene kiirgusenergia, W/m^2 ;

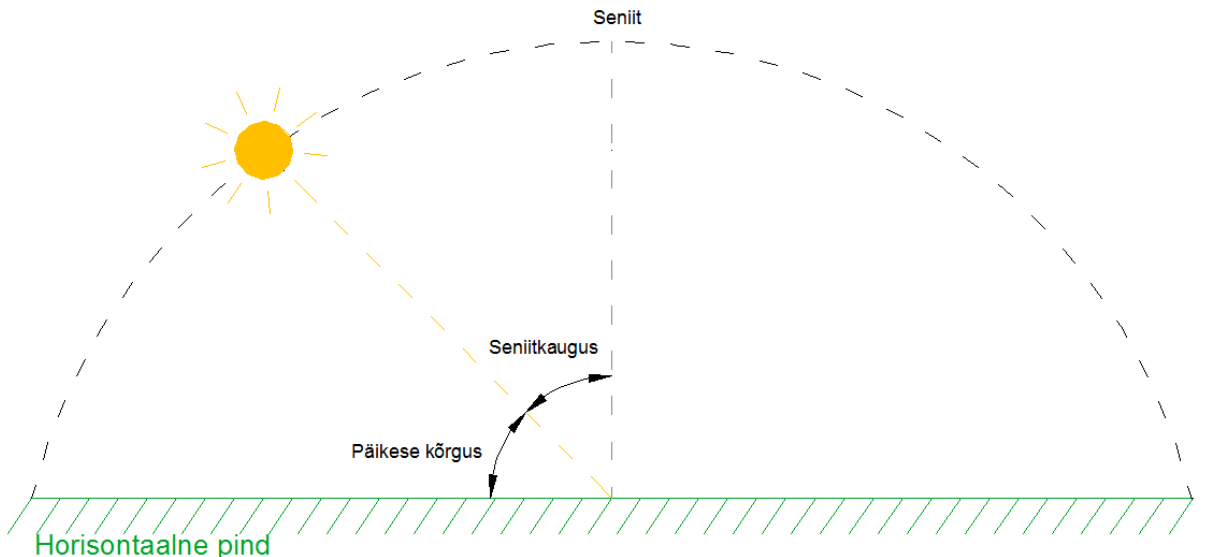
h_0 – Päikese kõrgus. [1]

„Päikese kõrgus on nurk horisondi ja vaatelejast Päikese suunas mõtteliselt kulgeva kiire vahel. Sageli kasutatakse Päikese kõrguse asemel tema seniitkaugust. See on nurk Päikese kiirte suuna ja seniidi vahel. Päikese kõrgus ja seniitkaugus on omavahel seotud lihtsa valemiga“ [1]:

$$h_0 + Z_0 = 90, \quad (1.2)$$

kus Z_0 on Päikese seniitkaugus, $^\circ$. [1]

Päikese kõrgust ja seniitkaugust illustreeritav pilt on toodud joonisel 2.1.



Joonis 1.1. Päikese kõrgus ja seniitkaugus

„Seda osa päikesekiirgusest, mis pärast hajumist õhu molekulidel, aerosoolil, veeaurul ja pilvedes langeb maapinnale, nimetatakse hajusaks kiirguseks ja tähistatakse D . Enamasti hajub päikesekiir enne aluspinnale jõudmist atmosfääris mitmeid kordi. Ka osa aluspinnalt hajusalt tagasi peegeldunud päikesekiirgusest jõuab pärast atmosfääris hajumist tagasi maapinnale, andes sellega lisa hajusale kiirgusele. Hajus kiirgus on seda suurem, mida suurem on Päikese kõrgus, mida rohkem on õhus hajutavat ainet (mida suurem on sumedus), mida rohkem on õhukesi kõrgeid ja keskmisi pilvi ja mida rohkem peegeldub aluspinnalt päikesekiirgust.“ [1].

Päikese otsese ja hajusa kiirguse summat nimetatakse summaarseks kiirguseks ja tavaliselt tähistatakse Q .

$$Q = S' + D, \quad (1.3)$$

kus Q on Päikese summaarne kiirgus, W/m^2 ;

D – Päikese hajus kiirgus, W/m^2 ; [1]

„Kogu horisontaalpinnale langenud päikesekiirgus ei neeldu, osa sellest peegeldub tagasi atmosfääri. Seda osa päikesekiirgusest nimetatakse peegeldunud kiirguseks ja tähistatakse tavaliselt R_q . Tuntud peegeldumise reeglid, mille puhul kiire peegeldumisnurk võrdub tema langemisnurgaga, siin ei kehti, sest tavaliselt ei ole aluspind sile, vaid kare. Seepärast mõeldakse aktinomeetrias kiirguse peegeldumise all tema hajusat peegeldumist, s.t pind hajutab kiirgust mitmesugustes suundades. Sellist kiirguse peegeldumist iseloomustatakse suurusega, mida nimetatakse albeedoks. Albeedo on arv, mis näitab, mitu protsenti

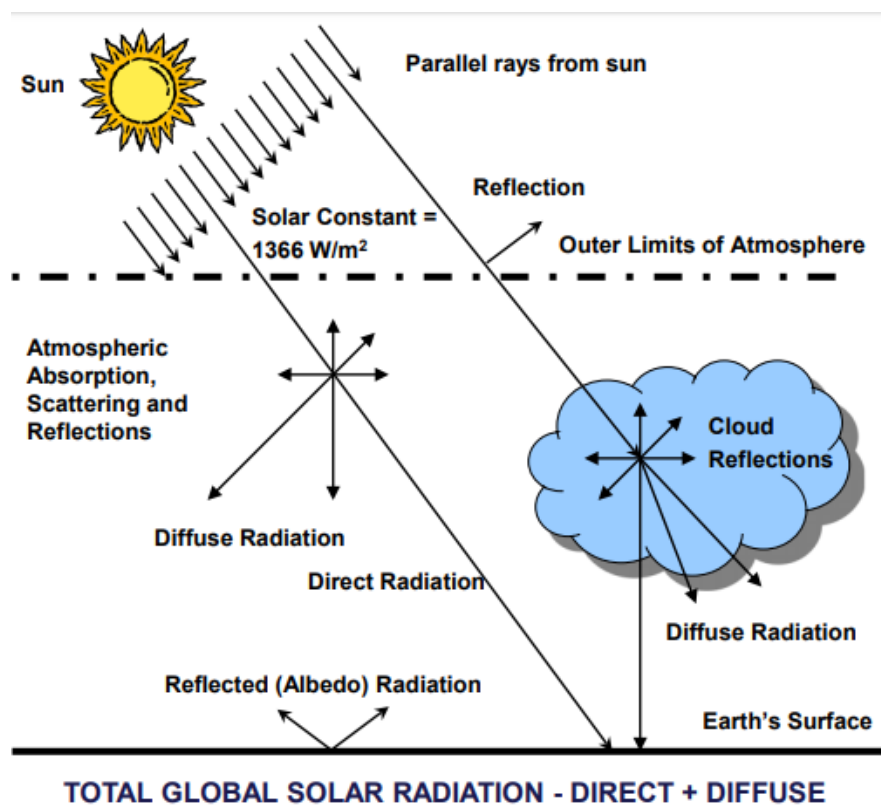
aluspinnaale langenud kiirgusest peegeldub hajusalt tagasi atmosfääri. Päikese kiirguse albeedo tähiseks on tavaliselt A_Q ja ta väljendub valemiga [1]:

$$A_Q = \frac{R_Q}{Q} \cdot 100, \quad (1.4)$$

kus A_Q on albeedo;

R_Q – peegeldunud kiirgus, W/m^2 . [1]

Kokkuvõtteks maapinnale langeva päikese kiirguse teekond algab päikesepinnast ning lõpeb horisontaalsel maapinnal. Päikese konstant atmosfääri ülalpiiril on 1367 kW/m^2 . Enne maapinna saavutamist osa päikese kiirgust hajub õhu molekulidel, aerosoolil, veeaurul ja pilvedes. Maapinna päikese kiirgus koosneb otsesest kiirgusest, hajusast kiirgusest ning peegeldunud kiirgusest. Horisontaalse pinna seisukohalt on oluline teada horisontaalsele pinnale langeva otsese kiirguse kuna tavaliselt maapind ei ole päikese kiirtega risti. Päikese kiirte teekond päikese ketast kuni maapinnani on toodud joonisel 1.2. [2]



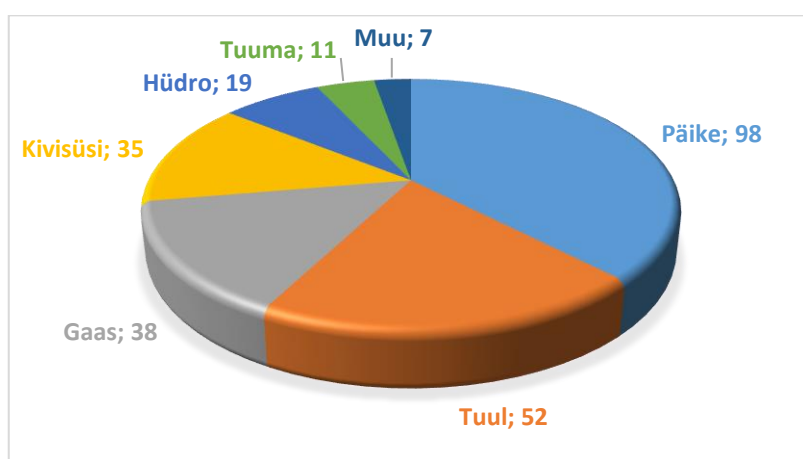
Joonis 1.2. Päikese kiirte teekond päikese ketast maapinnani [2]

1.2. Päikeseenergeetika

Kiirguskliima maa erinevates regioonides on väga erinev. Sõltuvalt geograafilisest asukohast päikesekiirguse intensiivsused muutuvad oluliselt kasvades lõuna ja põhjapoolusest ekvaatori suunas. Kõige rohkem päikesekiirgust, seoses kliimaatiliste iseärasustega, langeb horisontaalsele maapinnale Lõuna-Ameerika läänerrannikul, Araabia poolsaarel, Lõuna Aafrikas ning Lääne Austraalias. Nendes asukohtades summaarne aastane kiirgusenergia ületab $2700 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$. [3]

Eestis on vastavalt lisale 2 aastane kiirgusenergia horisontaalsele pinnale keskmiselt $1000 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ning päikesekiirtega risti pinnale $1100 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$. Maailma erinevate paikade horisontaalpinnale langeva otsese ja summaarse kiirgusenergia väärtused on esitatud lisas 1. Horisontaalpinnale langeva otsese ja summaarse kiirgusenergia väärtused Eestis on esitatud lisas 2 [3].

Päikeseenergia on energia, mis on saadud päikesekiirgusest. Päikeseenergia muundatakse tavaliselt elektriks ja/või soojuseks. Seisuga 2015 a oli maailmas installitud 200 GW päikeseenergiat muundavaid võimsusi. Aastal 2016 tõusis see number 300 GW-ni ning aastal 2017 oli see juba 400 GW. Prognoosi järgi tõuseb aastaks 2022 päikeseenergiat muundavate võimsuste väärtus 1 TW-ni [4, lk 5]. Võrreldes teiste energialiikidega ehitatakse maailmas kõige rohkem päikese- ja tuuleenergiat töötavaid võimsusi. Joonisel 1.2 on esitatud maailmas 2017. aastal ehitatud energiajaamade võimsused energialiikide järgi.



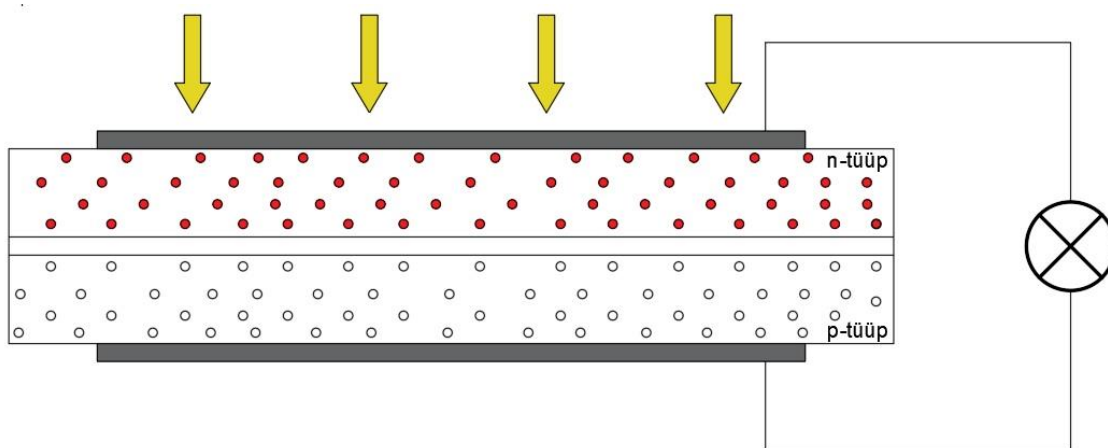
Joonis 1.2. Maailmas 2017. aastal ehitatud energiajaamade võimsuste (GW) jagunemine energialiikide järgi [4, lk 7]

Jooniselt 1.2 selgub, et kõige rohkem on maailma energeetikas suunatud taastuvenergialahenduste arenemisele ja kõige suurem osa sellest just päikeseenergiaga.

1.2.1. Päikesepaneelid

Elektrienergia saamiseks päikesekiirgusest kasutatakse PV-(*photovoltaic*)paneele. PV-paneelide tööpõhimõtte baseerub fotoelektrilisel efektil. Iga PV-paneel koosneb tegelikult paljudest väiksematest elementidest, mis on omavahel ühendatud kas jadamisi või rööbiti, sõltuvalt sellest, kui suurt voolu tugevust või pinget soovitakse saada. Iga element koosneb p- ja n-tüüpi pooljuhtmaterjali kihist. Mõlemad kihid koosnevad ränitüüpi päikeseptareid korral puhastatud ränist, mis lisandite abil on muudetud kas p- või n-tüüpi pooljuhiks. Esimeseks on enamasti kasutusel booriga legeeritud räni ning teiseks on fosforiga legeeritud räni.

Lisaks on päikeseptareid kaetud efektiivsuse suurendamiseks peegeldamisvastase kihiga. Valguse toimel pannakse pealmises pooljuhis selle laengukandjad liikuma, kuna päikesekiirguse energia on piisavalt tugev, et lüüa üksikud laengukandjad neid kinni hoidvast tuumast lahti. Et p-n-ülemineku abil on määratud voolu ainus võimalik liikumissuund, hakkavadki laengud selles suunas liikuma. Lisaks on mõlemad pooljuhid ühendatud omavahel väliste juhtmete ja energia tarbija abil, mis tekitabki kinnise vooluringi ning võimaldab meil sellest voolust kasu saada. [5]



Joonis 1.3. PV-paneeli tööpõhimõtte skeem

Kaasaegse PV-paneelide kasutegur on ligikaudu 20% ning seega vastavalt ülaltoodud andmetele kõige suurema võimaliku kasuteguriga (20%) horisontaalselt paigaldatud PV-

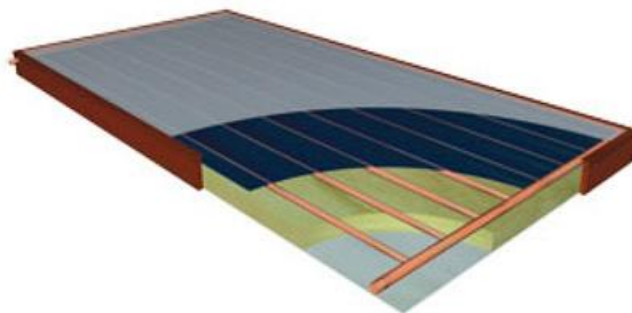
paneel keskmise aastase päikesekiirgusenergiaga asukohas Eestis ($1000 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$) võib maksimaalselt anda 1 m^2 pinnaga PV-paneel aastas $200 \text{ kW}\cdot\text{h}$ elektrienergiat. Paneelidega süsteemi võimsuse suurendamiseks tuleb suurendada pindala, kasutades suurt hulka kas jadamisi või rööbiti ühendatud paneele. Kuna tegemist on elektri tootmisega siis seadmestikku saab kaitsta levinud elektrotehnilise kaitseaparatuuriga ning on kasulik kasutada ka automaatjuhtimisesüsteemi.

1.2.2. Päikesekollektor

Kui enamus elektrienergiast kasutatakse vee soojendamiseks (eriti majapidamises), siis on otstarbekam hoopis kasutada päikesekollektorit. Päikesekollektorid on soojusvahetid, mille abil kantakse Päikese poolt kiiratud soojus üle kollektorit läbivale soojuskandjale. Teisiti öeldes on päikesekollektor seade, mis absorbeerib talle peale langevat päikesekiirgust ja muundab selle soojuseks, mis omakorda kantakse üle soojuskandjale, mis voolab läbi kollektori.

Päikesekollektorid on kahte liiki: lamekollektorid ja vaakumkollektorid.

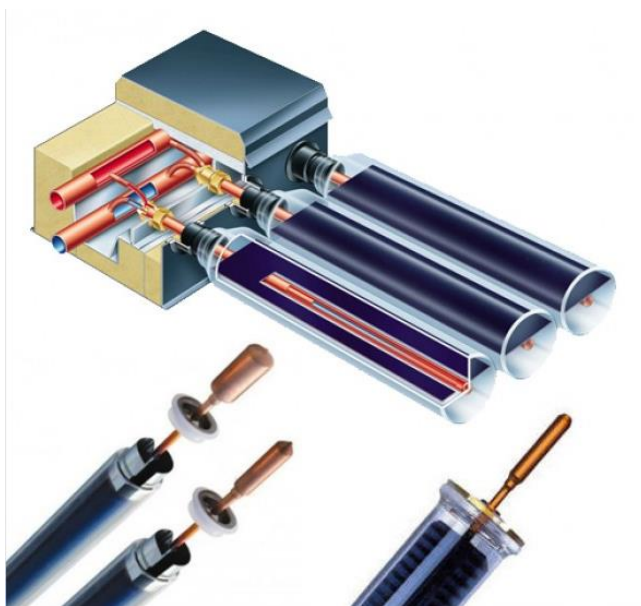
Lamekollektorit katab läbipaistev katteplaat. Päikesekiirgus läbib läbipaistva katteplaadi ning langeb nn mustale pinnale, mida nimetatakse absorbeerivaks pinnaks. Absorbeeriv pind on kontaktis soojuskandja torudega ning absorbeerinud päikesekiirgus kantakse soojusena üle torudes voolavale soojuskandjale. Soojuskandja transpordib soojuse edasi tarbijani või akumulatsioonipaaki. Absorberpinna all on soojusisolatsioonikiht, et vähendada soojuskadusid. Absorberis olevad peenikesed torud on mõlemast otsast ühendatud jämedamate kollektortorudega. Lamekollektori töötemperatuur on vahemikus $30\text{--}80 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [6, lk 32]



Joonis 1.4. Lamekollektor [7]

Vaakumtorukollektor koosneb soojustorust, mis on asetatud välise kesta sisse, milles on vaakum. Vaakumtoru vähendab soojuskadusid konvektsiooni ja soojusjuhtivuse teel, mistõttu vaakumtorukollektoritega on võimalik saavutada kõrgemaid temperatuure võrreldes lamekollektoritega (30-120 °C). [6, lk.33]

Nagu ka lamekollektorid, absorbeerivad vaakumtorukollektoridki otsast ja hajuskiirgust. Vaakumtorukollektorite efektiivsus on kõrgem madalate langemisnurkade juures, mis annab neile eelise võrreldes lamekollektoritega. Vaakumtorukollektorites kasutatakse soojustorus vedel-gaas faasimuutusega materjali soojuse ülekandmiseks. Soojustoruga on ühendatud mõlemal küljel absorberplaadid. Aurustunud soojuskandja tõuseb soojustorus ülesse, kus ta kondenseerub ja annab kondensaatoris soojuse ära vaakumtorusid ühendavale kollektoritorule, kus voolab soojuskandja, mis transpordib soojuse tarbijani (nt akumulatsioonipaaki). Veeldunud soojuskandja soojustorus langeb toru alumisse ossa ja protsess hakkab otsast peale. [6, lk.33]



Joonis 1.5. Vaakumkollektori toru [8]

Päikesekollektorite kasutegur võib ulatuda kuni 80% ning seega on ta neli korda efektiivsem võrreldes PV paneelidega. Päikesepaneeli kasutegur avaldub lihtsustatud valemi järgi [10]:

$$\eta = \eta_0 - \frac{K \cdot \Delta T}{E}, \quad (1.5)$$

kus η on päikesepaneeli arvutuslik kasutegur;

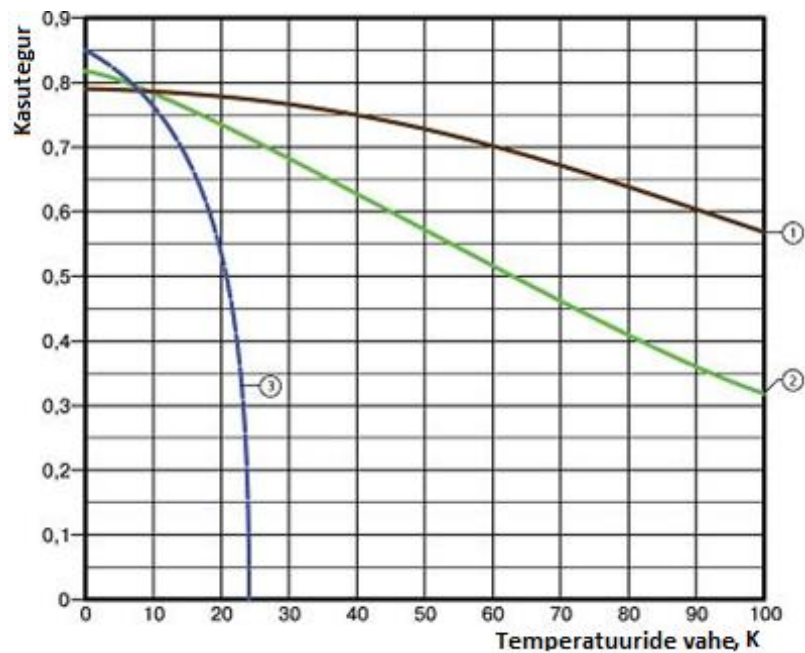
η_0 – päikesepaneeli nimikasutegur, kui $\Delta T = 0$;

K – kollektori tüübist ja tema isolatsioonist sõltuv tegur;

ΔT – soojuskandja ja välistemperatuuri vahe;

E – kiiritustihedus, kW/m².

Valemist (1.5) on näha, et kollektori kasutegur sõltub soojuskandja ja väliskeskkonna temperatuuride vahest ning mida väiksem on väliskeskkonna temperatuur seda väiksem on kasutegur. Sellest järeldub, et talvisel ajal ei ole kollektoritega süsteem nii efektiivne kui suvel. Päikesekollektorite kasutegurid sõltuvalt ΔT -st on esitatud joonisel 1.6.



Joonis 1.6. Kollektorite kasuteguri sõltuvus ΔT -st. 1 - Vaakumtorudega kollektor; 2 - Lamekollektor; 3 - Avatud absorbeeritav pind [11].

1.3. Süsteemide võrdlus

Tänapäeval päikeseenergia kasutamisevõimaluste efektiivsuse tõstmise küsimus on suure aktuaalsusega, mis järeldub peatükis 1.2. esitatud faktidest. Päikeseenergeetika on perspektiivseim kaasaegsetest energeetika harudest ning eriti taastuvenergeetika harudest.

Süsteemi valimisel tuleb lähtuda kõigepealt selle süsteemi otstarbest. Teisisõnu, vaja selgeks teha, kas on soov saada elektrit või soojust. Tuleb arvestada, et elektrit saab muundada soojuseks ilma suurte kadudeta, kuid vastupidine protsess on keerulisem ja tavaliselt seda ei ole otstarbekas kasutada.

Kui esimene valik on PV-paneelid, siis tuleb arvestada, et nende kasutegur on neli korda väiksem kui kollektoritel. See kõigepealt tähendab, et sama võimsuse saavutamiseks tuleb katta PV-paneelidega kuni neli korda suurem pindala. Kui tingimused võimaldavad kasutada suurt pindala, siis eeliseks on PV-paneelide lihtne paigaldus ja odavam hind võrreldes kollektoritega. Internetist otsides on võimalik leida PV-paneelidega süsteemi paigalduse lõpphinda, kuid kollektorite süsteemi puhul lõplik hind väga erinev sõltuvalt kollektorite tüübi ja ülejäänud seadmetiku valikust.

PV-paneelide süsteemi põhielemendiks on ikka paneelid ise, kuid edukaks süsteemi juurutamiseks vaja soetada järgmiste elementide kogum:

- PV-paneel(id);
- Akumulaator(id);
- Kontroller;
- Inverter.

Need on neli põhilist elementi, ilma milleta süsteemi ei saa efektiivselt kasutada. Päikeseenergia elektrienergiaks muundamise eeliseks on paneelide lihtne paigaldus ja ühendatavus ülejäänud süsteemi osadega painduvate juhtmetega, samuti lihtne kasutada automaatjuhtimist.

Kollektoritega süsteemi kogu hind jaguneb laias laastus kolmeks osaks [12]:

- Päikesekollektor(id) 1/3 kogu summast;
- Akumulatsioonipaak 1/3 kogusummast;
- Paigaldus ja ühenduskulud 1/3 kogusummast.

Vastavalt ülaltoodud andmetele koostati tabel 3.1. erinevate süsteemi maksumuse suhteliseks võrdluseks.

Tabel 1.1. Erinevate heliosüsteemide maksumuse võrdlus [13,14]

	PV paneel	Kollektor	
		Lame	Vaakum
Pindala, m ²	10	2	2,5
Hind, EUR	2611	816	2604
EUR/m ²	261	408	1041
η_0 , kui $\Delta T=15^\circ$, %	20	72	77
Ühe muundatud kW·h hind 1 a. pärast, EUR/kW·h *	1,31	0,56	1,35
Ühe muundatud kW·h hind 10 a. pärast, EUR/kW·h *	0,13	0,06	0,14

*Eeldusel, et $Q = 1000 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ aastas

Tabelist 1.1. selgub, et ühe vaakumtorukollektori pinnaühiku hind on ligikaudu neli korda suurem kui PV-paneeli pinnaühiku hind. Lamekollektori süsteemi hind on kaks ja pool korda madalam võrreldes vaakumtorudega kollektori süsteemi hinnast, aga vaakumkollektori kasutegur on suurem tänu oma kiirusenergiat neelavate torude paremale soojusisolatsioonile. Peale 10 a. kasutamist kõige soodsama muundatud kW·h energiahinda näitavad lamekollektorid ja nende kW·h hind peale kümme aastat on väiksem keskmisest kW·h elektrienergia hinnast Eestis. Kui põhikriteeriumiks on maksimaalne võimsus pinnaühiku kohta, siis valida tuleb kõige suurema kasuteguriga ja kõige kallima konstruktsiooniga päikesekollektori süsteem. Kui süsteemi tasuvus on tähtsam efektiivsusest, siis on tänapäeval otstarbekam valida lamekollektoreid.

Valemist (1.5) selgub, et kollektorite kasutegur sõltub otseselt soojuskandja ja väliskeskkonna temperatuuride vahest. Seega, kui vajatakse sooja vett aastaringselt siis kollektorite süsteem ei suuda elamule tagada sooja vett madala välistemperatuuriga talvisel ajal. Eestis on päikesekollektorid sobivad suvilate jaoks, kus vajatakse sooja vett hooajaliselt kõrgematel välistemperatuuridel, näiteks maist oktoobrini. PV-paneelide kasutegur on aastaringselt ühtlasem ning paneelide madalama hinna tõttu saab samade kulutuste korral süsteemi suurema pindalaga ja see võib katta elamu elektrienergiavajadus isegi väiksema investeeringuga. Kuna PV-paneelide süsteemi töö tulemuseks on elektrienergia ja elektrienergiat saab muundada mitmesugusteks inimesi huvitavateks energialiikideks, siis PV-paneelide kasutamine rahuldab vajadusi paremini.

2. PANEELIDE JUHTIMISSÜSTEEMID

2.1. Süsteemi juhtimise eesmärk

Kõige suurem kiiritustihedus tekib päikesekiirtega risti oleval pinnal (Päikese otsene kiirgus). Sel juhul peegeldub vastuvõtja pinnalt vähem kiirgust atmosfääri tagasi. Kuna päikese asend päeva jooksul taevast muutub, siis järgalt paigaldatud päikesepaneelide suhtes päikesekiired ei ole risti parimas suunas, vaid ainult teatud ajavahemikul, mis sõltub paneelide asendist. Paneelide liigutamine sünkroonselt päikese asendiga pikendab päikesekiirte soodsat suunda paneeli pinna suhtes ja see võimaldab paneelil muundada päeva kestel rohkem päikeseenergiat. Vastavalt lisadele 1 ja 2 on otsese kiirguse väärtused ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$) ristioleval pinnale ligikaudu 10% suuremad horisontaalsele pinnale langeva kiirguse summaarsest väärtusest ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$). Eesti tehtud mõõtmisi kirjeldavad kirjandusallikad, näiteks [1]. Erinevat liigi päikese kiirguse aastased väärtused Eesti kiirgustingimuste seisukohalt on esitatud lisas 3. Lisa 3 lühikokkuvõtte on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Eestis (Tiirikoja) päikese kiirguse keskmised väärtused aastast 1955-2000 [1].

Otsene kiirguse energia kiirtega risti pinale S , $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$	Horisontaalse pinna otsene kiirguse energia S' , $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$	Hajusa kiirguseenergia D , $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$	Summaarne kiirguse energia Q , $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$
929,98	453,23	497,38	949,09

Lisast 3 on näha, et päikese otsesest kiirgusest saadud aastane energia S Eestis on kaks korda suurem horisontaalsele pinnale langevast otsesest kiirgusest saadud energiast aastast S' . Kui asendada S väärtus S' väärtusega valemi (1.3) järgi ning võrrelda andmeid saame:

$$S + D = 929,98 + 497,38 = 1427,36 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2 \quad (2.1)$$

Vastavalt tabelile 2.1 on summaarne aastane kiirgusenergia horisontaalsele pinnale $949,09 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, mis on 44 % väiksem valemiga (2.1) saadud tulemusest. Soojuskandjaga paneelide liigutamisel tekitavad probleeme konstruktsioonis esinevad soojuskandja torud. Soojuskandja edastamine paneelist akumulatsioonipaaki painduvate voolikutega on seotud soojuskadudega ja on kulukas kallitest kvaliteetsetest materjalidest painduva konstruktsiooni

kasutamisel. PV-paneelide kasutamisel edastatakse elektrienergia painduvate elektrijuhtmetega. Elektrit saab muundada suure kasuteguriga soojuseks ning PV-paneelide hinnad on märgatavalt odavamad kollektoritest, mis jäeldub antud töö peatükist 1.3. Lähtudes eespoololevast konstruktsioonide kirjeldusest on just PV-paneelidega süsteeme lihtsam muuta päikeseasendit järgivaks. Vaadeldava töö eesmärgiks on kahe, erineval viisil asendi muutmisevõimalusega PV-paneeli juhtimissüsteemi loomine. Nende abil saab välja selgitada, kuidas valitud juhtimisalgoritmid mõjutavad paneelide efektiivsust meie laiuskraadil ja kumba varianti oleks otstarbekam kasutada päikesekiirguse elektrienergiaks muundamisel.

Eestis ei paista päike geograafilise asukoha tõttu seniidis mitte kunagi ning peale selle muutub päikese kõrgus h_0 päeva jooksul. Iga päev päikese tõusust alates hakkab päikese kõrgus h_0 kasvama 0° -st ning saavutab maksimaalse väärtuse keskpäeval ning keskpäevast päikeseloojanguni kõrgus väheneb maksimaalsest väärtusest 0° -ni. Kõige lihtsama juhtimissüsteemi tööpõhimõtte baseerub üheteljelisel konstruktsioonil, mis muudab paneeli asendit aluseks võttes päikese asimuuti. Maa pöörlemistelg omab $23,4^\circ$ -st kallet liikumisorbiidi suhtes. Selle tulemuseks on talve ja suve vaheldumine ja suvel on päikese kõrgus suurem kui talvel. Vastavalt kirjandusele [1] keskpäevased Päikese kõrgused iga kuu 15. kuupäeval Tartu linnas (Tõravere) on toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Keskpäevased Päikese kõrgused kuu 15. kuupäeval Tartus (Tõravere) [1].

Kuu	Päikese kõrgus, °
Jaanuar	10,6
Veebruar	18,7
Märts	29,5
April	41,5
Mai	50,6
Juuni	55,1
Juuli	53,3
August	45,9
September	34,9
Oktoober	23,3
November	13,3
Detsember	8,5

Tabelist 2.2 on näha, et suvekuude jaoks (aprill – august) optimaalne päikesepaneeli asend on 50° ehk jäigalt seisvate paneelide püstitamine selle nurga alla on optimaalne suveperioodile. Sellest järeldeb, et päikesepaneelide paigaldamine klassikalise kolmnurgakujulise katuse peale lõunapoolsele viilule on õigustatud paneelide kasuteguri suurendamise seisukohalt.

Oluline on see, et eristatakse magnetilist lõunasuunda ja tegelikku lõunasuunda. Magneetilist lõunasuunda saab määrata kompassi abil sest kompass pöörduv Maa magnetpooluse poole ja see ei ühtu Maa geograafilise poolusega. Tegelik lõunasuund on see, mis näitab Maa geograafilise lõunapooluse asendit. Fikseeritud asendiga päikesepaneel on vaja pöörata just tegeliku lõuna poole.[15]

Selleks, et tõsta paneelide efektiivsust kujundatakse vaadeldava töö raames paneeli Päikese asendi asimuuti järgi liigutatav juhtimissüsteem. Vertikaalse teljega asimuuti järgiva süsteemi korral Päikese kõrgus paneeli suhtes päeva kestel siiski muutub. Selle vähendamiseks valiti üheteljelise süsteemi korral paneeli pööramistelje asendiks ligikaudu paralleelse asendi maakera pöörlemistelje suhtes. Peale Päikese asimuudi järgimist saab järgida ka päikese kõrgust h_0 . Sellise juhtimissüsteemi loomiseks tuleb varustada paneeli liigutamise süsteem lisaks veel ühe teljega, mis võimaldab muuta ka paneeli kaldenurka. Võrreldes üheteljelisega süsteemiga võimaldab täiendatud päikeseasendi jälgimismehhanism kogu aeg jälgida Päikese asendit ning terve päev asetseb paneel Päikese kiirtega risti aastaringselt.

Vaadeldava töö raamides tehti ka mõõtmisi mõlema juhtimissüsteemi töö tulemuste võrdlemiseks. Süsteemid moodustavad ühise katsestendi, kusjuures katse ajal asuvad mõlemad paneelid samasugustes kiirgustingimustes. Katse käigus salvestati mõlema paneeli energia muundamise andmed ning saadud andmete põhjal koostati analüüs süsteemi kasulikkusest ning sai võrrelda mõlemalt süsteemilt saadud elektrienergiat.

2.2. Süsteemi juhtimise tööpõhimõte

Valmistatud süsteemi põhielemendiks on valitud kaks polükristallist valmistatud PV-paneeli *Velleman SOL10P* maksimaalse võimsusega 10 W. Paneeli andmed on esitatud tabelis 2.3. Paneeli joonis on toodud lisas 4.

Tabel 2.3. Paneeli *Velleman SOL10P* tehnilised andmed [16].

Näitaja	Väärtus
Maksimaalne võimsus, W	10
Pinge maks. võimsusel, V	17.6
Vool maks. võimsusel, A	0.58
Avatud ahela pinge, V	21.8
Lühisvool, A	0.61
Töötemperatuur, °C	-40 kuni +85
Elemendi materjal	polükristall
Elementide arv	36 (4 x 9)
Mõõdud, mm	356 x 253 x 30
Kaal, kg	1.16

Magistritöös kasutatava paneeli päikesekiirgust absorbeeriva pinna mõõdud on 320 x 230 mm. Absorbeeriva pinna pindala väärtus on:

$$S_{ap} = p_{ap} \cdot l_{ap} \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 320 \cdot 230 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,07 \text{ m}^2 \quad (2.2)$$

kus S_{ap} on päikesepaneeli absorbeeriva pinna pindala, m^2 ;

p_{ap} – päikesepaneeli absorbeeriva pinna pikkus, mm;

l_{ap} – päikesepaneeli absorbeeriva pinna laius, mm.

Elektrienergia arvutamisel ei ole otstarbekas lähtuda paneeli nimiandmetes märgitud võimsusest 10 W, kuna selle väärtuse saavutab paneel ideaalolukorras ja Eestis esineva kiiritustihedusest sõltuvalt on selle võimsuse saavutamine väga ebatõenäoline. Mis puudutab vaadeldavas magistritöös kasutatavate päikesepaneelide kasutegurit, siis nii internetist otsides, kui ka paneeli nimisildil ei tuvastanud sellist parameetri. Eeldusel, et valemi (2.1.)

$Q_{(s)} = S+D$, ehk päikeseenergia ühele ruutmeetrile aastas päikesekiirtega risti pinnale on $1427,36 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ning kaasaegsete paneelide kasuteguri väärtus on 20% (peatükk 1.2) saame eeldatavasti katses kasutatavast paneelist aastas energiat:

$$E_{pa} = Q_{(s)} \cdot S_{ap} \cdot \eta_p = 1427,36 \cdot 0,07 \cdot 20\% = 19,98 \text{ kW} \cdot \text{h}, \quad (2.3)$$

kus E_{pa} on paneelist maksimaalne saadud energia aastas Eestis ($\eta_p = 20\%$), $\text{kW}\cdot\text{h}$;
 η_p – kaasaegsete PV-paneelide maksimaalne kasutegur, %;
 $Q_{(s)}$ – maksimaalne kiiritustihedus päikesekiirtega risti pinnal Eestis, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$.

Vastavalt valemile (2.3) kasutatava paneeli keskmine energia päevas avaldub:

$$E_{pp} = \frac{E_{pa}}{365} = \frac{19,98}{365} = 0,0547 \text{ kWh} = 54,7 \text{ Wh}, \quad (2.4)$$

kus E_{pp} on paneelist keskmine saadud energia päevas Eestis ($\eta_p = 20\%$), $\text{W}\cdot\text{h}$;

Teiseks oluliseks süsteemi elemendiks on mootorid. Kuna vaadeldavas töös kasutatavad paneelid on kerged, siis neid saab kinitada servomootorite külge. Servomootor on tagasisidega mootor. Servomootorit käitatakse ühes või teises suunas vastavalt vajadusele ja peale etteantud positsiooni saavutamist pannakse mootor seisma. Kui erinevatel põhjustel mootori asend muutub võrreldes signaaliga määratud asendiga – suudab servomootor enda tagasi õigesse asendisse pöörata. [17]

Päikese liikumine taevas ei nõua paneeli pööramist täisringi ulatuses. Maksimaalne pööramisnurk kevadisel pööripäeval asimuudi järgi on 180° (Idast alustades Lääne poole) ning maksimaalne kõrgusnurk suvisel pööripäeval päikese kõrguse järgi Eesti kiirgustingimuste seisukohalt $< 60^\circ$ (tabeli 2.2 järgi). Seega, et servomootoriga juhtida päikeseasendit järgivat süsteemi on otstarbekas kasutada paneeli liigutamiseks servomootorit. Vaadeldavas töös valiti paneelide juhtimiseks servomootorid MG996R ja DS3218MG. Töös kasutatavate servomootorite tehnilised parameetrid on esitatud tabelis 2.4. Vaadeldavas magistris töös kasutatava servomootori pilt on esitatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1. Servomootorid DS3218MG (1) ja MG996R (2)

Tabel 2.4. Servomootori MG996R ja DS3218MG tehnilised parameetrid [18, 19]

Näitaja	MG996R	DS3218MG
Kaal, g	55	60
Mõõdud, mm	40,7 x 19,7 x 42,9	40 x 20 x 40,5
Käivitusmoment, N·m	0,92 (4,8 V); 1,08 (6 V)	2,1 (6,8 V)
Töökiirus, s/60°	0,17 (4,8 V); 0,14 (6 V)	0,16 (5 V); 0,14 (6,8 V)
Tööpinge, V	4,8...7,2	4,8...6,8

Päikesepaneelide juhtimissüsteemi tööpõhimõtte baseerub fototakistite fotoelektrilisel efektil. Juhul, kui kinnitada paneelile fototakisteid, siis saab võrrelda fototakistitel tekkivaid pingelangusid ja juhtida süsteemi muutes paneeli asendit fototakistitel takistuste väärtuste tasakaalustamiseks. Kui pingelangude väärtused fototakistitest on tasakaalus, siis paneeli asend on päikesekiirtega risti. Vaadeldavas töös valmistatud PV-paneelide juhtimissüsteemi tööpõhimõtte baseerub videoallikal [20].

Magistritöö tulemusena valminud kahe PV-paneeli juhtimissüsteemide plokkskeem on esitatud lisas 5.

2.3. Juhtimissüsteemi valmistamine

Vaadeldavas töös valisin kujundatava juhtimissüsteemi põhielemendiks Arduino perekonna arendusplaadi. Valitud perekonna arendusplaadid võimaldavad töödelda palju parameetreid ning sobiva juhtimisprogrammi abil automaatselt juhtida riist- ja tarkvara-vahelisi operatsioone.

„Arduino - on avatud lähtekoodiga elektrooniline prototüüpimise platvorm, mille kõige suuremateks eelisteks on tarkvara ja riistvara lihtsus ning paindlikkus. Kui räägitakse Arduinost, siis on tegemist kolme erineva tööriistaga.

"Esiteks on olemas mikrokontrolleril põhinev miniarvuti, mida võib osta ja ka ise ehitada erinevates suurustes vastavalt ideele ja eesmärkidele. Erinevatel plaatidel on kasutusel erinevat mikrokontrollerid. Arduino sisenditeks saab kasutada kõikvõimalikke sensoreid ning mooduleid: LDR valgussensoreid, potentsiomeetreid, infrapunasensoreid, puutekraane, GPS-mooduleid jne. Väljunditeks võivad olla kõlarid, LED lambid, LCD ekraanid, MIDI moodulid, mootorid ja teised elektroonikaseadmed" [21].

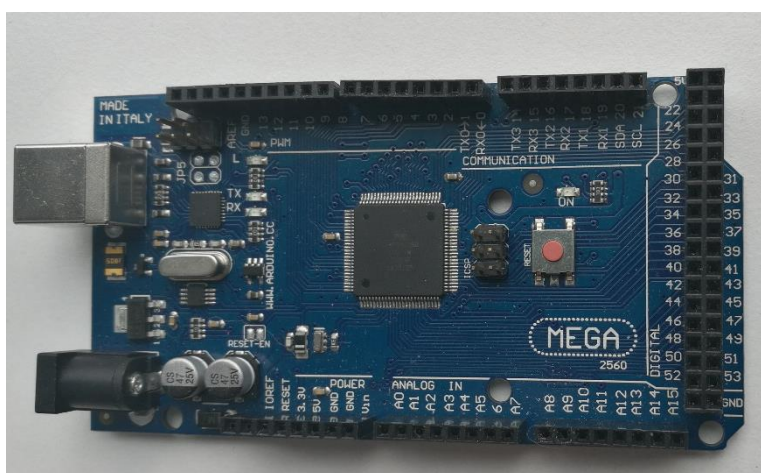
"Teiseks oluliseks tööriistaks on Arduino programmeerimiskeel, mis põhineb C/C++ keelel ning kompileerija, mille abil luuakse mikrokontrollerile kood. Arduino keel aitab lihtsustada keerulisi probleeme, mis võivad esineda riistvaraarenduse ning füüsilise interaktsiooni maailmas" [21].

"Viimaseks kolmandaks tööriistaks on Arduino lihtne avatud lähtekoodiga arenduskeskkond, mis töötab Windowsi, Mac OS Xi ja Linuxi peal" [21].

Arduino perekond sisaldab erinevaid plaate, mille baasil saab koostada erineva keerukusastmega projekte. Lihtsamate projektide jaoks ning algajatele sobivad sellised Arduino mudelid nagu Arduino UNO, Arduino 101 ja Arduino Pro. Mõõtudelt kõige väiksemad platvormid on Arduino Mini, Arduino Micro ja Arduino Nano. Keerukamate projektide jaoks on sobilikud Arduino Due, Arduino Zero ja Arduino Mega mudelid [22]. Viimane sisaldab kõige rohkem sisend- ja väljundkanaleid ja see oli põhjuseks miks Arduino Mega 2560 valiti vaadeldava magistritöö juhtimissüsteemi keskseadmeks. Peale sisendite ja nende arvu kogusest on erinevatel Arduino arendusplaatidel ka erinev taktisagedus, välgmälu ning maksimaalne lubatav tööpinge. Arduino Mega 2560 tehnilised parameetrid on toodud tabelis 2.5. Magistritöös kasutatava Arduino Mega 2560 pilt on esitatud joonisel 2.2.

Tabel 2.5. Arduino Mega 2560 andmed [23]

Kontroller	ATmega2560
Tööpinge, V	5
Toitepinge, V	7 - 12
Digitaalpesad	54
Analoogsisendid	16
Välkmälu, KB	256
Taktisagedus, MHz	16
Mõõdud, mm	101,52·53,3
Kaal, g	37



Joonis 2.2. Arduino Mega 2560 plaat

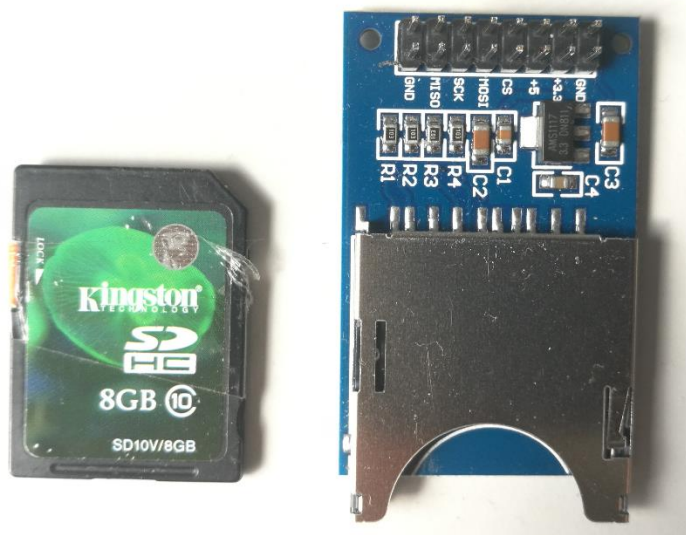
Arduino oluliseks eeliseks ka on erinevate valmis-laiendusmoodulite olemasolu alustades andurite moodulitest kuni WIFI, Bluetooth ja RFID mooduliteni. Arduino laiendusmoodulite valikuga saab tutvuda järgmise linki kaudu: https://arduino.ua/cat3-Plati_rasshirenii_Arduino [24].

Vaadeldava magistritöö käigus valmistatavasse süsteemi tuleb lisada sobiv SD-kaardi moodul andmete salvestamiseks et neid edaspidi töödelda tulemuste ja järelduste tegemiseks. SD-kaardi moodul võimaldab salvestada andmeid .csv ehk tabuleeritud väärtustega andmefaili formaadis vastavalt mooduli jaoks Arduino keskkonnas kirjutatud programmile. Magistritöö PV-paneelide juhtimissüsteemi skeemis kasutatakse Arduino SD-kaardi moodulit. SD-kaardina kasutatakse Kingston SD10V kaarti mahuga 8 GB kaarti. Andmed edastatakse Arduinost SD-kaardile SPI liidese abil. SPI (Serial Peripheral Interface,

SPI bus) on sünkroniseeritud kommunikatsiooniprotokoll, millega on võimalik vahetada digitaalsel kujul informatsiooni lühikeste andmeliinide kasutamisel. Seetõttu on SPI-siin laialdaselt kasutuses sardsüsteemide koostamisel [25]. Andmete edastus toimub nelja juhtmetega MISO, MOSI, SCK ja CS (SS). Signaalide olemus on järgmine:

- „SCLK (Serial Clock) – taktsignaali liin;
- MOSI (Master Out Slave In) – ülema poolt saadetud informatsioon;
- MISO (Master In Slave Out) – alama poolt saadetud informatsioon;
- SS (Slave Select) – liin, mis valib andmevahetuse jaoks õige alama“. [25]

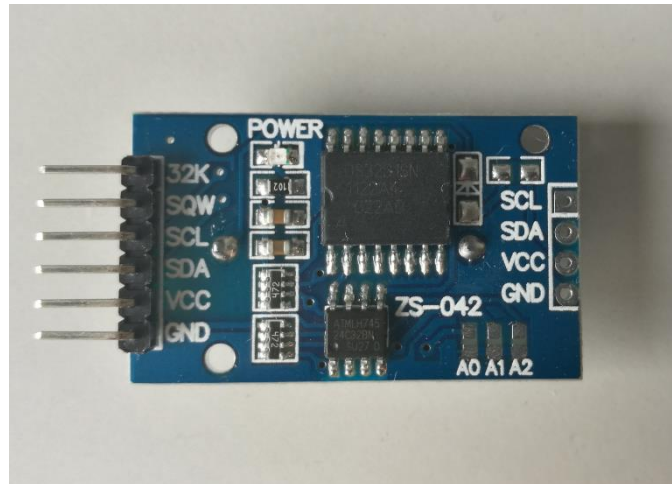
Antud magistritöös kasutataval Arduino Mega 2560 plaadil on SPI protokolliga jaoks etteantud digitaalsed viigud: *MISO* – 50; *MOSI* – 51; *SCK* – 52 ja *CS* – 53. SD-kaart koos Arduino SD-mooduliga on toodud joonisel 2.3.



Joonis 2.3. SD-kaart ja Arduino SD-moodul

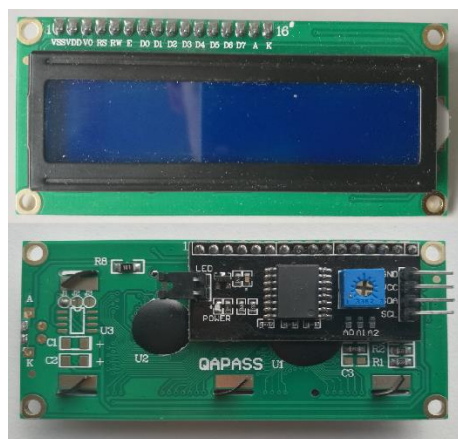
Andmeid tuleb jäädvustada ajateljel ning reaalaaja määramiseks soetati lisaks Arduino Mega-le reaalaajamoodul RTC 3231. Reaalaaja moodulilt saadud info alusel saab andmefaili salvestada andmete fikseerimise aja formaadis „DD:MM:YY, HH:MM:SS“. Moodulil on koht 3 V CR2032 patarei jaoks. Patareiga toide võimaldab salvestada reaalaega peale esialgset häälestamist, ehk teisisõnu patarei on mõeldud reaalaaja kellasüsteemi tööolukorras hoidmiseks. Reaalaaja mooduli RTC 3231 ja Arduino vaheliseks andmete vahetuseks kasutatakse I2C protokoll. I2C on kahejuhtmeline liides, milles andmete edastamiseks kasutatakse viikuseid SCL (Serial Clock) ja SDA (Serial Data). Vaadeldavas magistritöös

kasutataval Arduino Mega 2560 plaadil on I2C protokolliga jaoks etteantud eraldi viigud: *SDA* – 20 ja *SCL* – 21. Arduino Reaalajamoodul RTC 3231 on toodud joonisel 2.4.



Joonis 2.4. Arduino reaalajamoodul RTC 3231

Selleks, et katse käigus oleksid põhilised parameetrid ka visuaalselt jälgitavad, varustatakse süsteem ka 16 x 2 LCD ekraaniga. LCD ekraan on varustatud sarnaselt reaalajamooduliga I2C liidesega ja mis võimaldab ka Arduino ja mooduli vahelist andmeedastust ainult kahe juhtmega. Magistritöös kasutatava 16 x 2 LCD ekraani pilt on esitatud joonisel 2.5.



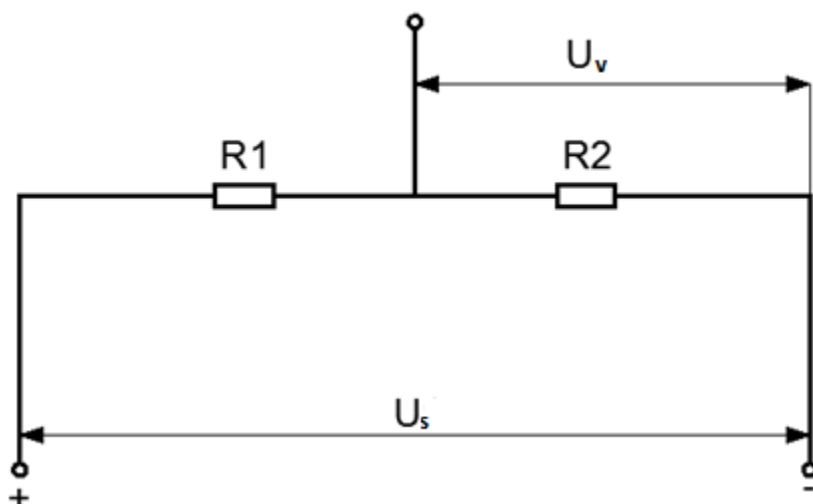
Joonis 2.5. 16 x 2 LCD ekraan koos I2C liidesega

Päikesepaneeli töörežiimide analüüsimiseks on mitu võimalust. Esimeseks võimaluseks on elektrienergia akumulatsioon ning aku laadimistase seire. Teiseks võimaluseks, mida kasutati vaadeldavas magistritöös, on paneelide koormustakistitel tekkiva pinge mõõtmine (koormatud paneeli väljundpinge). Mõõdetud pingeväärtuste alusel arvutati hetkvõimsused valemi (2.5) abil:

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}, \quad (2.5)$$

kus P on paneeli võimsus, W;
 U – paneeli pinge, V;
 R – paneeli ahelasse lisatud takistus, Ω ;
 I – paneeli vool, A.

Tabelist 2.3 on näha, et töös kasutatavate paneelide maksimaalne avatud ahela pinge ehk elektromotoorne jõud on 21,8 V. Arduino Mega 2560 plaadi analoogsisendite pinge võib olla 0...5 VDC [23]. Selleks, et mõõta Arduino Mega 2560-ga antud töös kasutatava paneeli pinget tuleb skeemi varustada pingejaguriga. "Pingejagur on elektrialtel, mille väljundpinge moodustab osa sisendpingest. Väljundpinge suurus sõltub elektrialhela moodustavate takistite takistuse suhtest" [26]. Kahe takistiga pingejaguri elektriskeem on toodud joonisel 2.6.



Joonis 2.6. Pingejaguri skeem

Skeemi väljundpinge on arvutatav järgmise valemiga:

$$U_v = U_s \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right), \quad (2.6)$$

kus U_s on sisendpinge, V
 U_v – väljundpinge, V;
 R_1, R_2 – paneeli ahelasse lisatud takistused, Ω .

Vaadeldava magistritöö raames kasutati takistiteks R_1 ja R_2 püsitakisteid väärtustega vastavalt 170 ja 30 Ω . Pingejaguri tegur väärtus avaldub:

$$k = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} = \frac{170 + 30}{30} = \frac{200}{30} = 6,66, \quad (2.7)$$

kus k on pingejaguri tegur.

See tegur näitab, mitu korda on Arduinole edastatav pinge väiksem pingest paneeli väljundklemmidel. Reaalse pinge fikseerimisel tuleb päikesepaneelide juhtimisprogrammis korrutada pingejagurist saadud signaali väärtus pingejaguri teguriga. Enne skeemi siselülitamist tuleb kontrollida, kas pingejagurist saadud pingeväärtus ei ületa Arduino plaadile lubatava maksimaalse pinge väärtuse 5 V.

$$U_2 = \frac{U_1}{k} = \frac{21,8}{6,66} = 3,27 \text{ V} \rightarrow 3,27 \text{ V} < 5 \text{ V}, \quad (2.8)$$

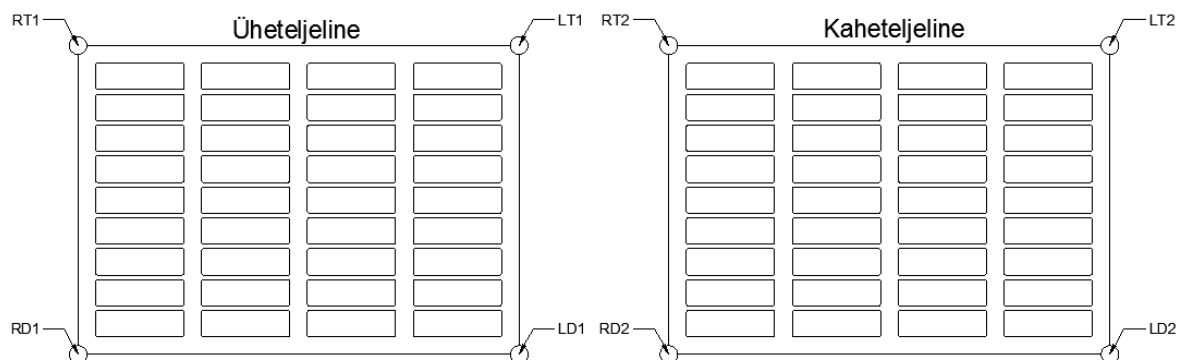
Valemist (2.8) on näha, et pingejagurist saadud maksimaalse pingeväärtus on väiksem maksimaalselt Arduino plaadile lubatava pinge väärtusest. Pingeväärtusest energia saamiseks tuleb kasutada valemit (2.5) ning korrutada saadud võimsus pingeväärtuse salvestamise intervalli pikkusega, kasutades valemit (2.9).

$$E_p = \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{2i}^2}{R_1 + R_2} \right) \cdot \Delta t, \quad (2.9)$$

kus E_p on paneelist väljastatav energia, W·s;

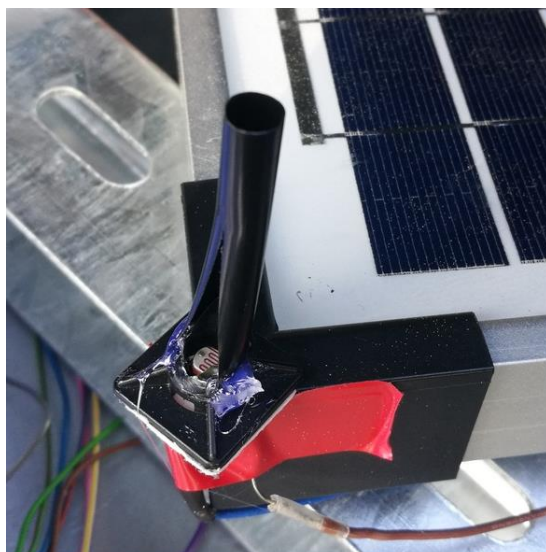
Δt – mõõtmiste salvestamise samm, s.

Peale ülalkirjeldatud seadmete ja elementide oli vaja süsteemi lisada veel teisi elektroonikakomponente. PV-paneeli igasse nurka paigaldati fototakisti, millel tekkiv pingelang edastatakse Arduino analoogsisenditele. Kokku paigaldati kaheksa fototakistit ja need ühendati Arduino analoogsisenditega A0...A7. Iga fototakisti ahelasse tuli lisada püsitakisti. Vaadeldava juhtimissüsteemi puhul kasutati 5 kΩ takisteid. Fototakistite asukohad paneelide küljes ja nende tähised on esitatud joonisel 2.7.



Joonis 2.7. Fototakistite asetused ja nende tähised paneelidel

Päikesekiirguse toimel fototakisti takistus ja sellel tekkiv pingelang väheneb ja seda saab ära kasutada suunatudliku mõõtesüsteemi kujundamiseks. Fototakisteid varjutati PV-paneeli poolsest küljest päikesekiirte suhtes. Selle tagajärjel varjutatakse vähemalt üks fototakistitest kui paneel ei asu päikesekiirtega risti ning juhtimissüsteem väljastab servomootorile signaal paneeli asendi muutmiseks. PV-paneelide juhtimissüsteemi fototakistite varjeks kasutati musta joogikõrt. Fototakistite varje vaade on esitatud joonisel 2.8.



Joonis 2.8. Fototakisti varje

Analoogsisendite tundlikkuse häälestamiseks on skeemi lisatud 10 k Ω potentsiomeeter. Potentsiomeeter määrab fototakistite signaalide erinevuse piirväärtuse, mille ületamisel hakkavad servomootorid muutama päikesepaneelide asendit. Fototakistite ja kontrolleri ühendamiseks kasutati painduvaid vaskjuhtmeid. Programmi laadimiseks Arduino Mega 2560-sse kasutati plaadi küljes asuvat USB pesa mis ühendati USB kaabli abil arvutiga.

Enne skeemi kokku monteerimist koostati juhtimissüsteemi elektriline skeem kasutades Autodesk Eagle keskkonda. Skeemil paiknevad kõik tabelis 2.5 loetletud elementid ja on näidatud elementidevahelised ühendused. Kahe PV-paneeli juhtimissüsteemi elektriline skeem on esitatud lisas 6. Mõned konstruktsioonielemendid liimiti isoleerliimiga (nt. fototakistite konstruktsioon). Kontrollerist eraldi asuvate elementide omavaheliseks ühendamiseks kasutati Arduino prototüüpimise laiendusplaati. Plaadi külge joodeti kõik juhtimissüsteemi jaoks vajalikud elemendid vastavalt lisas 6 esitatud elektrilisele skeemile. Juhtimissüsteemi elektrilise osa (skeem asub lisas 6) elementide spetsifikatsioon ja elemendile vastava eksplikatsioon on esitatud tabelis 2.6.

Tabel 2.6. PV-päikesepaneelide juhtimissüsteemi elektrilise osa spetsifikatsioon

Jrk. nr.	Element	Kogus	Tähis skeemil
1	Paneel Velleman SOL10P	2	PANEEL_1_KLEMMID, PANEEL_2_KLEMMID
2	Servomootor MG996R	2	SERVO1, SERVO3
3	Servomootor DS3218MG	1	SERVO2
4	Arduino Mega 2560 plaat	1	ARDUINO MEGA 2560
5	Reaalajamoodul RTC3231	1	RTC-DS3231
6	SD kaardi moodul	1	SD_KAARDI_MOODUL
7	LCD ekraan 16·2 (I2C)	1	LCD_EKRAAN
8	Fototakisti	8	LT1, LD1, RT1, RD1, LT2, LD2, RT2, RD2
9	Takistus 5 kΩ	8	R1...R8
10	Takistus 110 Ω	2	R9,R11
11	Takistus 330 Ω	2	R10,R12
12	Potentsiomeeter 10 kΩ	1	TOL

Tabelist 2.3 on näha, et kasutati väikesegabariidilisi paneele ning tänu sellele paneeli juhtimise süsteemi kõige suurem gabariit jäi 1 m piiridesse ja valmistamise kulud taskukohaseks. Konstruktsiooni aluseks valiti plekist riiul mõõtudega 1000 x 600 x 32 mm. Alusele kinnitati metallist nurkadega perforeeritud U-profiil 2,5 x 50 x 50 mm, kõrgusega 440 mm. Profiili ülemisse otsa külge kinnitati servomootorite paigaldamiseks (lisa 7) 3D printeril valmistatud detailid.

Paneelide kinnituste projekteerimise käigus joonestati AutoCAD-i keskkonnas kinnituste 3D-mudelid. Plastkinnituste ülesandeks on ühendada U-profiil ja paneelid servomootorite abil. Lähtudes tabeli 2.2 andmetest on üheteljelise paneeli konstruktsioon on valmistatud nii, et paneeli pöördumise telg on 50° kaldega, et saada maksimaalselt energiat suvel. Mootor muudab asendit vastavalt päikeseasendi muutuse asimuudi järgi. Kaheteljelise paneeli kinnituseks asetatakse kaks servomootorit mille telgedevaheline nurk on 90°, kusjuures ühe mootori pöörlemistelg on vertikaalne ja teine horisontaalne. Vastavalt Päikese asendile muudab juhtimissüsteem PV-paneeli asendit sõltuvalt nii päikese kõrgusest, kui ka asimuudist. Kõigi konstruktsioonide omavahelisteks kinnitusteks kasutati polte. Paneeli kinnituste joonised on esitatud lisas 7. Juhtimissüsteemi katsestendi vaade on näidatud lisas 8.

2.4. Programmi koodi kirjutamine

Arduino perekonna arendusplaatide programmeerimiseks saab kasutada paljusid programmeerimiskeeli, millega saab programmi kompileerida. Arduinode oluliseks populaarsuse tõstjaks on tasuta saadaolev arenduskeskkond, mis kasutab C keelega sarnast programmeerimiskeelt. Peale selle on eeliseks veel aktiivne kasutajatugi, lihtne ülesehitus, põhjalikult seletatud näidisprogrammid ning sobivus kõikide operatsioonisüsteemidega [22]. Arduino programmeerimiskeskonda saab alla laadida Arduino kodulehelt <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.

Programmi koostamise eeliseks Arduino keskkonnas on valmisteekide kasutamise võimalus. Tänu teekide kasutamisevõimalustele kujuneb mõnede seadmete juhtimisprogrammi koostamine ainult paari rea kirjutamiseks. Samuti saab installeeritud Arduino keskkonnast leida erinevaid näidisprogramme koos kommentaariga, mis aitavad isegi algajatel aru saada olulisemate elektroonikaseadmete ja laiendusmoodulite tööpõhimõttest.

Iga programmi kirjutamine algab vajalike teekide sisestamisest. Vaadeldava magistritöö raames kirjutatavas programmis kasutatavate teekide nimikiri on järgmine:

- *Wire* – teek I2C protokolliga jaoks. I2C protokolliga kasutab LCD ekraan ning Reaalajamoodul;
- *LiquidCrystal_I2C* – 16 x 2 LCD ekraani teek;
- *arduino_RTC* – reaalajamooduli RTC3231 teek;

- *Servo* – servomootori teek;
- *SPI* – teek SPI protokollil jaoks. SPI protokollil töötab SD kaardi moodul;
- *SD* – SD-kaardi mooduli teek.

Peale teekide lisamisest programmi alguses defineeritakse kõik töös kasutatavad laiendusmoodulid (RTC, LCD, SD), defineeritakse servomootorite nimetused ja nende algasendid ja lõpuks antakse analoogsisendite definitsioon.

Pärast programmi algosa lõpetamist algab iga Arduino projekt funktsioonidest "Void Setup" ja "Void Loop".

"Void Setup" on iga Arduino programmi alguses osa, kus määratakse need käsud, mis Arduino täidab kohe peale kompileerimist ning rohkem ta neid ei täida. See tähendab, et antud käsud täidetakse üks kord peale programmi käivitamist. [27]

Antud magistritöös kirjutatud päikesepaneelide juhtimissüsteemi osas "Void Setup" alustatakse töö LCD ekraaniga ja lülitakse sisse reaalaeg. Peale seda defineeritakse kolme servomootorite kanalid ja antakse signaal servomootorite pööramiseks algasendisse. Algasend on ette antud nii, et katse alguses on paneelid pööratud lõuna poole.

Kui kõik käsud osas "Void Setup" on täidetud, algab järgmine programmiosa "Void Loop". "Void Loop" on koht programmis kuhu koondatakse need käsud ja operatsioonid, mis Arduino hakkab täitma tsükliliselt esimesest käsust alustades ning korduvalt peale viimase "Void Setup" programmi osa käsu lõpetamist. "Void Loop" programmi täitmine lõpetatakse ainult siis, kui katkestada Arduino plaadi toide. [27]

Vaadeldava magistritöö programmi "Void Loop" osa algab järgmiste parameetrite defineerimisest:

- Antakse igale fototakistile vastav nimetus;
- Teisendatakse signaal paneelist voltidesse vastavalt pingejaguri tegurile k ;
- Defineeritakse potentsiomeetri kanal tundlikkuse määramiseks;
- Arvutatakse fototakistitelt saadud signaalide erinevused;
- Kuvatakse vajalikud väärtused LCD ekraanile;

Pärast ülaltoodud loetelus kirjeldatud protsesside lõpetamist algab programmiosa "Void Loop" raames teostatav arvutuslik osa. Esialgu loetakse signaalid fototakistitest A0...A7.

Peale seda arvutatakse keskmised väärtused vasakul pool ja paremal pool (AVL, AVR) üheteljelise paneeli kohta. Kaheteljelisel paneelil lisaks vasakpoolsele ja parempoolsele (AVL2, AVR2) väärtusele loetakse keskmine väärtus üleval ja allpool (AVT2, AVD2). Järgmisena arvutatakse erinevus vasakpoolsetes osades parempoolsete osadega võrreldes (DIF1 - paneel 1 ja DIF2 - paneel 2) ning kaheteljelisel paneeli arvutatakse erinevus ülevates ja altosas (DIF3). Antud erinevused omakorda tuleb võrrelda potentsiomeetrist etteantud tundlikkusega TOL. Juhul kui DIF väärtused ei asu $-TOL \dots +TOL$ piires, siis algab programmiosa servomootorite asendi muutmiseks. Kui vasakult poolt langeb Päikest fototakistile rohkem, siis servomootor muutub asendi ühe sammu võrra vasakule ning vastupidi. Kaheteljelisel paneelil lisaks kontrollitakse, et oleksid ka tasakaalus väärtused üleval ja all. Kui servomootorid saavutavad programmis etteantava servomootori asendi lõppväärtuse - siis rohkem servomootorile signaali asendi muutmiseks ei anta. Servomootorite lõppväärtused on need väärtused, mille puhul paneel on kokkupuutes katseendi konstruktsiooniga. Programmi "Void Loop" osa kirjeldatav skeem on toodud lisas 5. "Void Loop" programmiosa lõpus on koostatud kood vajalikute andmete salvestamiseks tekstifaili sisse edasiseks importimiseks ja töötlemiseks Microsoft Exceli keskkonnas.

Kokkuvõtteks, "Void Setup" on ettevalmistamine programmi käivitamiseks, kus defineeritakse kõik koostatava programmi pesad, nende eesmärk (Input või Output) ja määratakse programmis kasutatavad laiendusmoodulid ja teised elektroonikaseadmed. "Void Loop" on korduvalt täidetav programmiosa. Sellesse programmiosasse paigutatakse need operatsioonid, mis tsükliliselt korduvad ja mille järgi tuleb juhtida servomootoreid etteantud ajaviivitusega.

Magistritöö raames koostatud programm päikesepaneelide juhtimiseks on toodud lisas 9.

3. JUHTIMISSÜSTEEMI KATSETAMINE

3.1.Katsestendi kokkupanemine ning esmane katsetus

Pärast programmi kirjutamist ning skeemi kokkupanemist oleks tarvis kontrollida, kas kõik toimub vastavalt peatükis 2 toodud kirjeldusele. Kuna tegemist on kiirgusest sõltuva juhtimissüsteemiga, siis esmaseks kontrolliks asetati katsestend ilma akendeta pimedasse ruumi, kus paiknes ainult üks kiirgusallikas ja mille asukohta muudeti peale järjekordse lugemi saamist. Esmase katse eesmärgid on järgmised:

- Programmi üldise struktuuri korrektsuse kontroll. Kas kõik elemendid on korrektselt ühendatud ja kas programm käivitub või mitte.
- Servomootorite töö korrektsus. Siin tuleb selgeks teha, kas mootorid toimivad vastavalt programmile signaalide erinevuse olemasolul;
- Fototakistitest signaalide kontrollimine. Kas paneelide keskristisringel asuva püsiva valgusallika korral tulevad Arduino plaadile ühesuguse väärtusega signaalid kõikidest fototakistitest, või tuleb korrigeerida mõne fototakisti signaal parandusteguriga;
- Andmete salvestamise kontroll SD-kaardile. Kuna kogu töö tulemused otseselt sõltuvad katse käigus salvestatud andmetest, siis oleks vaja kontrollida salvestatud andmete õigsust ning formaadi sobivust Microsoft Exceli keskkonnaga.
- Arduino LCD ekraani peal näidatud ja paneelide klemmidel mõõdetud pinge. Tuleb kontrollida, kas Arduino mõõdab pinget korrektselt või mitte.

Esmase katse käivitamisel programmi üldises struktuuris olulisi puudusi ei tuvastanud. Programm sai kompileeritud, lühist ei tekkinud ja kõikides laiendusmoodulites oli nähtav toite indikaatorite põlemine. Vastavalt valgusallika asendile pöördusid mootorid õigesse suunda kuid mootorite peatumine oli pisut ebatäpne, nii et paneelid ei olnud valgusallikast saabuvate kiirtega risti.

Fototakistite signaalide kontrollimisel selgus, et valgusallika asetamise korral paneeli keskosa kohale andmed erinesid üksteisest. Selleks, et tõsta juhtimissüsteemi töö täpsust esmase katse käigus käsitsi sisestati parandustegurid andurite töö tasakaalustamiseks

juhtimisprogrammi koodi sisse. Fototakistitelt saadud andmete põhjal koostati kaks Exceli tabelit, eraldi Paneeli 1 ja Paneeli 2 jaoks. Fototakistite katsetulemused on esitatud lisas 10. Paneelide fototakistite parandustegurid on esitatud tabelis 3.1. Katsetulemused on näidatud lisas 11.

Tabel 3.1. Fototakistite paranduskoefitsiendid

Andur	LD1	LT1	RD1	RT1	LD2	LT2	RD1	RT2
Keskmine väärtus	274	452	558	493	321	240	521	317
Parandustegur	1,8	1,1	0,9	1,0	1,3	1,0	2,2	1,3

Tabelist 3.1 on näha, et väärtused fototakistitest ühtlase valguse toimetel paneelide keskele erinevad. Juhul, kui jätta see probleem lahendamata, siis see mõjutab kogu süsteemi täpsust. Juhtimissüsteemi täpsuse suurendamiseks sisestati käsitsi programmi koodi sisse fototakistite parandustegurid.

Esmase katse andmete salvestus õnnestus korrektselt. Paari minuti jooksul salvestati kellaaega ja pingeväärtusi programmis määratud ajaintervalliga. Andmed olid edukalt sisestatud Microsoft Exceli keskkonda ja nendega saab töö tulemusi analüüsida. Esmasel katsel saadud pingeväärtused teisendati energia ühikutesse vastavalt valemile (2.5). Esmase katse salvestatud andmed on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Esmase katse jooksul salvestatud andmed

Jrk. nr.	Kellaaeg		Paneeli 1 pinge, V	Energia paneelist 1, W·s	Paneeli 2 pinge, V	Energia paneelist 2, W·s
1	10-05	18:30:02	0,32	0,00093	0,26	0,00061
2	10-05	18:30:06	0,32	0,00093	0,28	0,00071
3	10-05	18:30:10	0,34	0,00105	0,28	0,00071
4	10-05	18:30:15	0,49	0,00218	0,42	0,00160
5	10-05	18:30:19	0,46	0,00192	0,38	0,00131
6	10-05	18:30:23	0,4	0,00145	0,34	0,00105
7	10-05	18:30:27	0,32	0,00093	0,26	0,00061
8	10-05	18:30:32	0,51	0,00236	0,42	0,00160
9	10-05	18:30:36	0,48	0,00209	0,4	0,00145
10	10-05	18:30:40	0,49	0,00218	0,42	0,00160
11	10-05	18:30:44	0,36	0,00118	0,32	0,00093
12	10-05	18:30:49	1,48	0,01991	1,54	0,02156
13	10-05	18:30:53	0,38	0,00131	0,3	0,00082
14	10-05	18:30:57	0,46	0,00192	0,38	0,00131
15	10-05	18:31:01	0,61	0,00338	0,93	0,00786
16	10-05	18:31:05	0,49	0,00218	0,4	0,00145

Tabelist 3.2 on näha, et vahepeal samm erineb ühe sekundi võrra. Põhjuseks on Arduino mõõtmiste intervalli määramine millisekundites. Vaadeldava töö kontekstis ajaintervali ebaühtlus andmete salvestamisel olulist rolli ei mängi ning selle võib jätta arvesse võtmata. Püsiva valgustuse korral pinged mõlemast paneelist asuvad vahemikus 0,3...1 V. Kokkuvõttes saab öelda, et salvestatud andmed on rahuldavad.

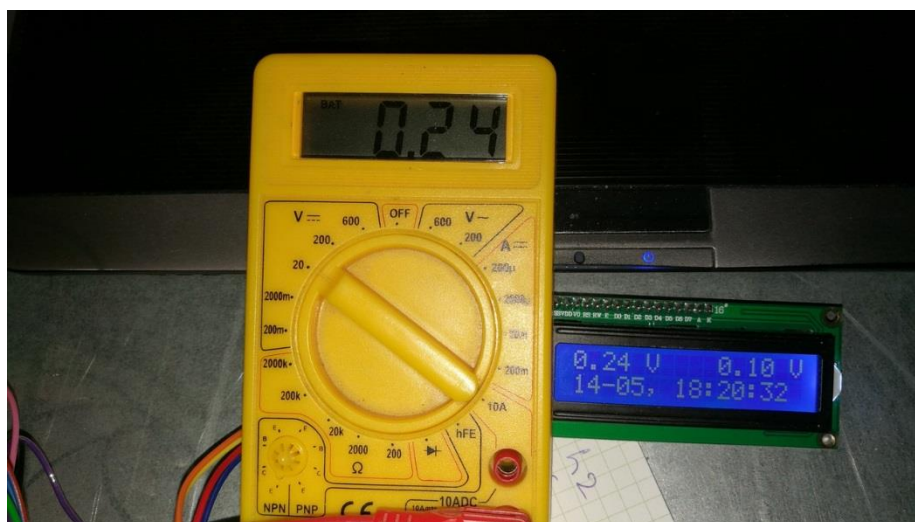
Viimaseks mõõdeti pinge paneelide klemmidel ja võrreldi nende pingeväärtuste LCD ekraanil kuvatud pingeväärtustega. Arduino mõõdab pingeväärtused vahemikus 0...5 V ning seda väärtust ta muudab täisarvuks (muutuja tüüp - integer) vahemikus 0...1023. Tulenevalt sellest pinge mõõtmise samm avaldub:

$$\Delta U = \frac{U_2}{i_{max}} = \frac{5}{1023} = 0,0049 \text{ V} = 4,9 \text{ mV} \quad (3.1)$$

kus ΔU on pinge mõõtmise samm, V;

i_{max} – integer-muutuja maksimaalne väärtus Arduinol.

Valemist 3.1 järeldub, et iga Arduino analoogsisendi signaali ühik vastab 49 mV-le, ehk teisisõnu pinge mõõtmise viga paneeli klemmidel on 49 mV. Üheteljelise paneeli (paneel 1) pinge mõõtmise kontroll näidatud joonisel 3.1.



Joonis 3.1. Paneeli 1 pinge mõõtmise kontroll

Testriga mõõdetud pingete väärtused mõlemast paneelist erinevad LCD ekraanil näidatavast pingeväärtustest maksimaalselt 0,1 V võrra ning seega tulemus on rahuldav.

3.2. Põhikatsed

Kõige olulisem põhikatses erinevus esmasest katsest on see, et valgusallikaks on laualambi asemel Päike. Päikese toimel hakkavad paneelid muundama elektrienergiat päikesekiirguse toimel. Põhikatsete käigus prooviti testida juhtimissüsteemi erinevate ilmaolude ja kellaaja korral ja selgitati erinevate langemisnurkade mõju paneelide efektiivsusels. Põhikatsete käigus pöörati tähelepanu paneelidest neeldunud elektrienergiale. Arvutused andmete töötlemisel põhinevad valemite (2.5) ja (2.9) kasutamisele.

Esimene põhikatses tehti Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi katusel. Katse kuupäevaks oli 18.05.2019. Katse algas kell 13:24 ning lõppes kell 17:31. Edasi nimetatakse tekstis seda katset "Katse 1". Ilmaandmed Katse 1 perioodil olid vastavalt Riigi ilmateenistuse portaalile [28] järgmised:

- Temperatuur varieerus vahemikul 21-23 °C;
- Tuulekiirus 2-4 m/s;
- Pilvitus kogu katse käigus 0/10. [28]

Katseandmete põhjal koostati paneelidelt saadud elektrienergia ja keskmiste hetkvõimsuste graafiku tundide lõikes, mis on esitatud lisas 12.

Selleks, et teada saada katsestendi tulemusi madala päikese kõrguse korral, tehti katsestendiga täiendav katse alates päikesetõusust (edaspidises tekstis nimetatakse "Katse 2"). Katsestend oli paigaldatud Katse 2 ajaks teisse asukohta, mis asus eramaja kõrval asuva garaaži katusel. Katse kuupäevaks oli 19.05.2019 ning katse algas vara hommikul kell 05:00 ning lõppes kell 15:00 ehk katse 2 kestus oli 10 tundi. Katse 2 tulemused on esitatud lisas 13.

Ilmaandmed vastavalt Riigi ilmateenistuse infole katse 2 perioodil olid järgmised:

- Temperatuur varieerus vahemikul 15-24 °C;
- Tuulekiirus 1-4 m/s;
- Pilvitus kogu katse käigus varieerus 0/10 kuni 4/10. [28]

Kolmanda katsena (edasi Katse 3) prooviti katsetada stendi vahelduva pilvisuse olemasolul. Katsetulemusest tehti järeldused kuidas ja mis suuruses mõjutab paneelide efektiivsusele taevas esinevad pilved, kuna katsete 1 ja 2 jooksul taevas oli täiesti pilvitu või väikese pilvisusega (kuni 4/10). Katse kuupäevaks oli 23.05.2019 ning katse algas hommikul kell 08:00 ning lõppes kell 14:00 ehk katse kestus oli neli tundi. Kuna ilmaolud tunduvat erinesid katse 3 jooksul, siis ilmaandmed iga tunni kohta esitatakse tabelina (tabel 3.3). Katse 3 tulemused graafikuna on esitatud lisas 14.

Tabel 3.3. Katse 3 ilmaandmed [28]

Kellaeg	Temperatuur, °C	Tuulekiirus, m/s	Pilvitus, 0-10/10
08:00	14	5	9/10
09:00	13	5	9/10
10:00	12	10	10/10
11:00	12	4	9/10
12:00	12	5	1/10
13:00	13	6	3/10

Tabelist 3.3 selgub, et katse 3 alguses taevas oli pilvede täis (9-10/10) ning peale kella 12:00 pilvisus praktiliselt kadus (1-3/10). Päikesepaneelides neeldunud energia on otseselt sõltub pilvisusest, mida saab näha lisas 14 esitatud Katse 3 tulemuse graafikus. Keskmise ja suure pilvisuse korral magistritöös valmistatud juhtimissüsteem otsib vahepeal mitte Päikese asendit, vaid kohta, kust fototakistite peale langeb rohkem valgust. Seda võib arvestada juhtimissüsteemi peamiseks eeliseks, sest pilvede olemasolul ei ole Päikese asendi suunas orienteeritud paneeli asend on kõige kasulikum kiirguse neeldumise suhtes suure hajusa kiirguse osakaalu tõttu.

Vastavalt kiirguse levimise üldiselt tunnustatud seaduspärasustele päikesepaneelide klemmidel tekkiv elektromotoorne jõud avaldub valemi (3.2) järgi.

$$U_{\alpha} = U \cdot \cos(\alpha), \quad (3.2)$$

kus U_{α} – paneelide klemmidel arenev pinge langemisnurka α korral, V;
 α – päikesekiirte langemisnurk, °. [29]

Valemi 3.1 põhjal saab koostada tabeli paneeli efektiivsuse sõltuvusest erinevate päikesekiirte langemisnurkade kohta (tabel 3.4).

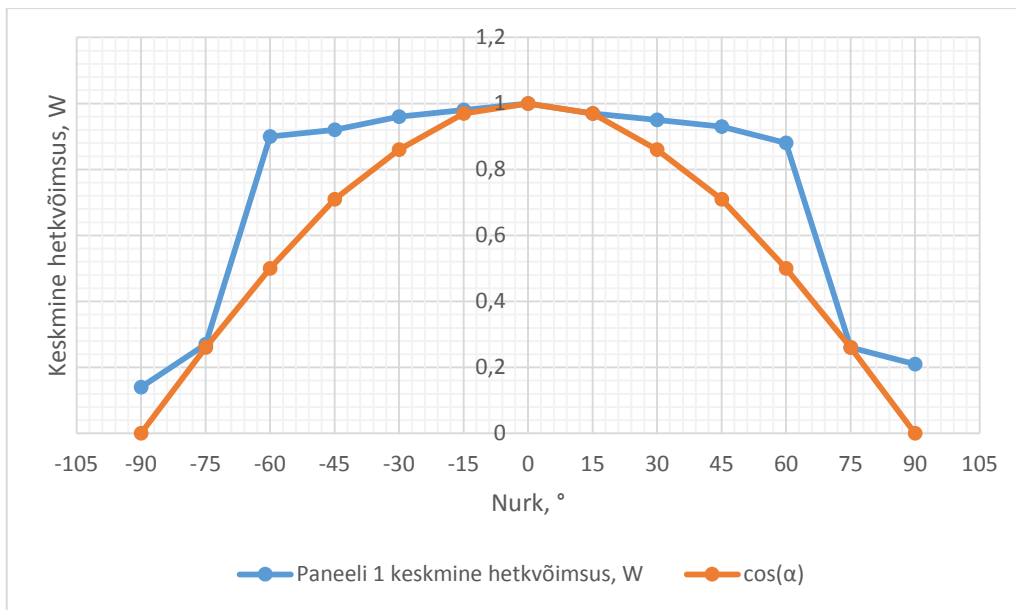
Tabel 3.4. PV-paneeli efektiivsuse sõltuvus päikesekiirte langemisnurgast

Langemisnurk, °	Paneeli efektiivsus kiirtega risti pinna suhtes
-90	0
-75	0,26
-60	0,5
-45	0,71
-30	0,86
-15	0,97
0	1
15	0,97
30	0,866
45	0,71
60	0,5
75	0,26
90	0

Viimase katsena (edasi Katse 4) kontrolliti üheteljelise paneeli päikesekiirte langemisnurka mõju paneeli 1 efektiivsusele. Katse 4 sooritamiseks paigutati paneel 1 päikesekiirtega risti ning pärast iga 50 sekundi paneeli asetus muudeti 15 ° võrra vahemikul -90 °...90 °. Tabeli 3.4 saadud tulemusega võrdlemiseks teisendati Katse 4 tulemused suhtarvudeks, võttes päikesekiirtega risti tulemused 1-na. Katse 4 tulemused on koondatud tabelis 3.5. Katse 4 tulemused on esitatud joonisel 3.2.

Tabel 3.5. Katse 4 koondandmed

Nurk	Energia paneelist 1, W·s	Paneeli 1 keskmine hetkvõimsus, W	Paneeli 1 hetkvõimsus suhtarvuna
-90	14,03	0,28	0,14
-75	26,27	0,53	0,27
-60	89,08	1,78	0,9
-45	90,65	1,81	0,92
-30	94,85	1,90	0,96
-15	97,03	1,94	0,98
0	98,74	1,97	1
15	95,48	1,91	0,97
30	93,60	1,87	0,95
45	91,02	1,82	0,93
60	83,36	1,67	0,88
75	23,12	0,46	0,23
90	21,06	0,42	0,21



Joonis 3.2. Katse 4 tulemused ja cos-seaduse järgi arvutatud pinnale langev kiiritustiheduse suhtelise väärtuse muutmine sõltuvalt pinna ja kiirte vahelisest nurgast

Tabeli 3.4 ja joonise 3.2 saadud tulemustest selgub, et oluline paneelide väljundvõimsuse alanemine tekib alles peale 60° pööramist võrreldes päikesekiirtega risti asuva asendiga ja erineb oluliselt cos-seaduse järgi arvutatud pinnale langev kiiritustiheduse suhtelisest väärtusest samadel pööramisnurkadel. muutmine sõltuvalt pinna ja kiirte vahelisest nurgast.

3.3. Tulemused ja arutelu

Katse 1 tulemusena on lisa 12 esitatud graafik, millest on näha, et kaheteljeliselt süsteemilt (paneel 2) saadi nelja tunniga rohkem energiat. Üheteljeliselt süsteemilt (paneel 1) saadi Katse 1 käigus kokku 32549 W·s elektrienergiat. Paneelist 2 saadi 32860 W·s elektrienergiat, mis on 1 % rohkem võrreldes paneeli 1 käigus saadud energiast. Keskmised hetkvõimsused paneelidel on vastavalt 2,26 ja 2,28 W. Võimsuse hetkväärtused on oluliselt madalamad paneeli nimivõimsusest kuna vastavalt valemile (2,7) on koormustakistuse väärtus 200Ω on liiga suur võimsuse 10 W saavutamiseks vastavalt valemile (2,5).

Katse 2 tulemisi näidatavalt graafikult (lisa 13) on näha, et Katses 2 päikesetõusu ajal nii katse alguses kui ka keskpäeval paneelides tunni aja kestel paneelides neeldunud energia varieerub mõlemal paneelil 6600 - 7800 W·s. Kokku neeldus Katse 2 käigus paneelis 1 kokku 72635 W·s energiat ja paneelis 2 73464 W·s energiat. Samuti on graafikust näha kaheteljelise süsteemi eelis esimese tunni jooksul, kus Päike just tõusis ning Päikese kõrgus

oli madal. Kokku alates kella 05:00 kuni kell 06:00 muundas kaheteljelise süsteemiga paneel 11% rohkem energiat (vastavalt 6607 W·s ja 7348 W·s). Sellest võib järelduda, et kaheteljelise pööramisteljega süsteem suurendab efektiivsust madala päikesekõrguse korral päikesetõusu ja -loojangu ajal. Paneel 2 muundas kogu Katse 2 jooksul 1 % rohkem energiat. Seega tulemus on sarnane Katse 1 tulemusega. Keskmised hetkvõimsused Katse 2 käigus on vastavalt 2,04 W ja 2,08 W, mis on tunduvalt vähem Katse 1 saadud keskmistest hetkvõimsuste väärtusest 2,26 W ja 2,28 W. Katse 1 ja Katse 2 ilmaandmetest selgub, et paneelide hetkvõimsuste väärtustele mõjutas Katse 2 käigus esinev madal pilvisus (kuni 4/10).

Lisast 14 on näha (Katse 3 tulemused), et tugeva pilvisuse korral kell 08:00 - 12:00) paneel 1 muundas rohkem elektrienergiat. Seda võiks põhjendada sellise asjaoluga, et paneelide töö tulemused pilvisuse olemasolul sõltuvad oluliselt atmosfääris tekkivas kiirgust hajutavatest ainetest ja katsetulemusi prognoosida ei saa. Samuti pole lisas 14 esitatud tulemuste alusel võimalik teha üldistatud järeldusi. Saab aga kindlasti järeldada, et horisontaalse pinna jaoks serveeritud andmeid ei saa kasutada kaldu asetatud päikesepaneelide töö tulemuste ennustamiseks. Kui Katse 3 käigus pilvisus hakkas vähenema (kell 12:00 - 14:00), siis katsetulemused läksid vähemmuutlikuks ning Katse 1 ja 2 tulemustega sarnaseks. Kui Katse 3 jooksul pilvisus vähenes, siis paneelist 2 neeldunud energia suurenes võrreldes paneelist 1 neeldunud energiaga. Kokku Katse 3 jooksul paneel 1 andis 31929 W·s elektrienergiat ning paneel 2 30123 W·s. Keskmised hetkvõimsused Katse 3 käigus on vastavalt 1,48 W ja 1,4 W.

Katse 4 tulemused erinevate langemisnurkade juures paneelist erinevad langemisnurkade juures koosinus-seaduse graafikust. Sellest katsest saab kindlasti järeldada, et paneelide töö tulemused sõltuvad oluliselt neid ümbrisevatest kehade ja nende peegeldumisomadustest.

Analüüsides tabelite 3.4 ja 3.5 tulemusi võib teha järeldused, et Katse 4 käigus paneeli efektiivsust erinevate langemisnurkade korral mõjutas oluliselt hajusa ja peegeldunud kiirguse osakaal elektrienergia muundamisel ning seetõttu isegi 90 ° kaldega paneeli klemmidel tekkis elektomotoorne jõud, mis võimaldas tekitada paneelil võimsust ligikaudu 0,4 W.

Andmete täiendavaks arusaamiseks tasub statistiliselt analüüsida ka paneelidest saadud pingeväärtusi katsete jooksul. Pingeväärtuste aritmeetiline keskmine avaldub:

$$U_k = \frac{\sum U_1 \dots U_n}{n}, \quad (3.3)$$

kus U_k on pingeväärtuste aritmeetiline keskmine, V;
 U_1 – katse esimese mõõtmise pingeväärtus, V;
 U_2 – katse viimase mõõtmise pingeväärtus, V;
 n – katse mõõtmiste arv.

Edasiseks andmete töötlemiseks tuleb arvutada mõõteseeriade pingeväärtuste standardhälved valemi (3.3.) järgi. Standardhälve iseloomustab vastuste hajuvust keskmise ümber[30] :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (U_i - U_k)^2}{n}}, \quad (3.4)$$

kus σ on mõõteseeria standardhälve, V;
 U_i on mõõtmise pingeväärtus, V;

Katsete 1-3 tulemuste põhjal ning valemite (3.3) ja (3.4) abil koondatakse statistilised andmed tabelisse 3.6.

Tabel 3.6. Katsete 1-3 koondandmed Üheteljelisel paneelil (paneel 1) ja kaheteljelisel paneelil (paneel 2)

Katse	U_k (paneel 1), V	U_k (paneel 2), V	σ (paneel 1), V	σ (paneel 2), V
1	21,24	21,34	1,11	1,13
2	20,08	20,32	2,07	1,39
3	16,46	15,72	4,97	5,64

Tabelist 3.6 on näha, et päikesepaistelisel ilmal (Katse 1) on keskmine pingeväärtus paneelide klemmidel erineb 0,1 V võrra ning standardhälved on vastavalt 1,11 V ja 1,13 V.

Kui vaadelda andmed alates päikesetõusust päikesepaistelise ilma korral (katse 2), siis tänu kaheteljelisele süsteemile keskmine pingeväärtus (paneel 2) on 0,24 V suurem võrreldes üheteljelise süsteemiga (paneel 1). Standardhälve Katse 2 jooksul on üheteljelise süsteemi korral oluliselt suurem just madala efektiivsuse tõttu päikesetõusu ajal.

Katse 3 andmete keskmised pingeväärtused on madalamad katse jooksul esineva vahelduva pilvisuse tõttu ning seetõttu standardhälvete väärtused on suuremad katsete 1 ja 2 hälvetest (vastavalt 4,97 V ja 5,64 V).

Katse 4 andmete analüüsiks tuleb arvutada eraldi standardhälbed iga langemisnurka jaoks. Katse 4 statistilised andmed on koondatud tabeli 3.7.

Tabel 3.7. Katse 4 täiendavad statistika andmed

Nurk	Uk, V	σ , V
-90	7,32	0,09
-75	10,10	0,11
-60	18,09	0,02
-45	19,04	0,03
-30	19,38	0,02
-15	19,60	0,04
0	19,77	0,02
15	19,45	0,03
30	19,25	0,03
45	18,99	0,01
60	18,17	0,03
75	9,59	0,11
90	8,65	0,13

Tabelist 3.7 on näha, et standardhälvete väärtused jäävad valdavalt vahemikku alla 0,01 V...0,03 V (nurkade vahemikus -60°...60°), oluliselt suuremad hälbed -90°, -75°, 75° ja 90° juures. Kuna katse kestel kiirgustingimused olid püsivad, siis võiks arvestada need standardhälved mõõteveana. Isegi mõõteviga kuni 0,03 V annab põhjust järeldada, et mõõtetulemused on piisava täpsusega.

Märgatav on see, alles pööramisnurkade -90°, -75°, 75° ja 90° korral vastavalt joonisele 3.2 esineb suur väljundpinge vähenemine võrreldes väiksemate pööramisnurkadega. Kuna suurte pööramisnurkade korral otsest kiirgust paneelile peaaegu ei lange, siis pööramisnurkade -90°, -75°, 75° ja 90° juures hälvete suurenemise põhjuseks võiks olla ümbritseva keskkonna muutuvad hajusad ja/või otsesed peegelduvad kiirgusvood.

KOKKUVÕTTE

Vaadeldava magistritöö eesmärgiks on kahe erineva juhtimissüsteemiga PV-paneelide töö tulemuste võrdlus. Töö raames kujundati paneeli Päikese asendi asimuudi järgi liigutava juhtimissüsteemi. Peale Päikese asimuudi järgimist kujundati veel ka teine juhtimissüsteem, mis järgib ka lisaks päikesekõrgust h_0 . Sellise juhtimissüsteemi loomiseks lisati paneeli liigutamise süsteemi veel üks pööramistelg, mis võimaldab muuta ka paneeli kaldenurka. Juhtimissüsteemi valmistamiseks koostati elektrilised juhtimiskeemid, valmistati katsestendi metallkonstruktsiooni ning kirjutati juhtprogrammi koodi.

Juhtimissüsteemi põhielemendiks on Arduino Mega 2560 arendusplaat. Programmi kood kirjutati Arduino arenduskeskkonnas. Juhtimisprogramm baseerub fototakistite fotoelektrilisel efektil. Iga paneeli serva külge on kinnitatud fototakistid ning vastavalt signaalide erinevusele antakse signaalid paneeli pööramiseks Päikese asendi järgimiseks.

Seadme valmistamisel tehti süsteemi erinevate osade töövõime määramise kontrollkatseid ja peale valmimist mõõtmisi erinevate pilvituste ja Päikese asendite korral juhtimissüsteemide töövõime kontrollimiseks. Kõigepealt kontrolliti mõlema paneeli muundatud elektrienergia kogus katse jooksul ning sellest katsest selgus, et mõlemad juhtimissüsteemid omavad samaväärsed efektiivsust. Päikesepaistelise päeva jooksul kaheteljeline süsteem muundas kiirgust elektrienergiaks 1% võrra rohkem. Üheteljelise süsteemi head tulemust saab põhjendada paneeli kinnituse õige asendiga päikesekiirtega suhtes suvise perioodi jaoks (paneeli pööramistelje kaldenurk horisontaalpinna suhtes on 50°). Sel põhjusel annab üheteljeline paneel häid tulemusi isegi madala Päikese kõrguse korral varastel kella-aegadel kuni Päikese asimuudini $\pm 90^\circ$ lõunasihist, ± 6 tundi astronoomilisest keskpäevast. Katse 2 alguses (alustati kell 05:00 hommikul, NB suvine aeg) kahe tunni kestel peale päikesetõusu, muundas kaheteljeline paneel 11 % rohkem elektrienergiat.

Päikesepaneelide neeldunud energia on otseselt sõltuv pilvisusest, mis järeldub paneelide töö tulemuste andmetest tugeva pilvisuse olemasolul. Keskmise ja suure pilvisuse korral magistritöös valmistatud juhtimissüsteem otsib vahepeal mitte Päikese asendit, vaid seda kohta, kus poolt langeb fototakistite peale rohkem valgust. Samuti pilvede olemasolul ei ole

Päikese kiirtega risti asuv paneeli asend on kõige kasulikum kiirguse neeldumise suhtes suure hajusa kiirguse osakaalu tõttu.

Seda võiks põhjendada asjaoluga, et paneelide töö tulemused pilvisuse olemasolul sõltuvad oluliselt atmosfääris esinevatest kiirgust hajutavatest ainetest ja seetõttu katsetulemusi prognoosida ei saa. Samuti pole nende alusel võimalik teha üldistatud järeldusi. Saab aga kindlasti järeldada, et horisontaalse pinna jaoks serveeritud andmeid ei saa kasutada kaldu asetatud päikesepaneelide töö tulemuste ennustamiseks pilvede olemasolul.

Paneeli pööramisel päikesekiirte suhtes esineb oluline paneelide võimsuse vähenemine peale 60° pööramist võrreldes päikese kiirtega risti asuva asendiga. Pööramisnurka muutmisel saadud tulemused ei vasta kiirguse levimise üldiselt tunnustatud seaduspärasustele. Vastavalt koosinuse trigonomeetrilise valemi alusel paneeli tööpinnale ei lange otsest kiirgust kui päikesekiired on pinnaga rööbiti. Katse käigus aga 90° -se pööramisnurga korral paneeli väljundvõimsus oli kuni 0,5 W peegeldunud ja hajusa kiirguse esinemise tõttu.

Magistritöö tulemusena on valmistatud katsestend, millega saab määrata PV-paneeli väljundvõimsust ning sellest saadud energiat ja mida saab kasutada aastaringselt. Stendiga saadud katsetulemused kinnitavad PV-paneelide pööramissüsteemide kasulikkust ning vaadeldava seadme edasiarenemisel saab täiendavaid andmeid analüüsimeks töös kirjeldatud süsteemide kasulikkust võrreldes jäigalt seisvate PV-paneelide süsteemidega.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Russak, V; Ain, K. (2003). Eesti kiirgusliima teatmik. Tallinn: Eesti meteoroloogia ja hüdroloogia instituut. 384 lk.
2. Solar radiation. Chapter 2 (2012) – *Jim Dunlop Solar*. <http://ecgllp.com/files/3514/0200/1304/2-Solar-Radiation.pdf> (05.05.2019)
3. Solar resource maps and GIS data for 180+ countries – *SolarGIS*. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/> (21.03.2019).
4. Watson, J; Schmela, M. (2018). Global market outlook for solaar power 2018-2022. Brussel – *Solar Power Europe*. <http://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2018-2022/> (23.03.19).
5. PV paneelide tööpõhimõtte ja tootlikus – *SolarEst* <http://solarest.eu/kasulik-teada>. (23.03.19).
6. Rosin, A; Link, S; Drovitar, I. (2013). Energia lokaalse tootmise analüüs büroohoonele Osa I. Taastuenergialahendused. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. – 82 lk.
7. Как самостоятельно сделать простые солнечные коллекторы – *SolarB*. <http://solarb.ru/kak-samostoyatelno-sdelat-prostye-solnechnye-kollektory> (27.03.2019).
8. Вакуумный солнечный коллектор Altek SC-LH2-15 – *Прометей*. <https://xn--e1aamjfh.com.ua/alternativnoe-teplo-i-elektroenergija/solnechnye-kollektory/vakuumniy-solnechniy-kollektor-alktek-sc-lh2-15.html> (27.03.2019).
9. Termosyfonowe systemy ogrzewania słonecznego – *Atmosfera*. <https://www.atmosfera.eu/produkcja/termsyfonowe-systemy-ogrzewania-slonecznego/> (27.03.2019).
10. Количество поставляемой энергией солнечным коллектором – *Solar-kollektor*. http://solar-kollektor.ru/solar_collector_kpd.htm (31.03.2019)
11. Про эффективность и КПД солнечного коллектора – *Teplodarom*. <http://www.teplodarom.com/site.xp/049054051124051048057.html> (31.03.2019)
12. Päikeseküte. Päikesekollektor – *Ehitusinfo* <http://www.ehitusinfo.ee/index.php?aid=1713> (30.03.19)
13. Päikesepaneelide hinnad – *Energogen* <https://energogen.ee/paikesenergia/naidislahendused/> (31.03.19)

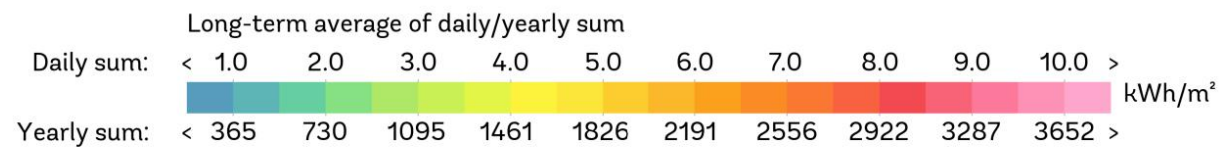
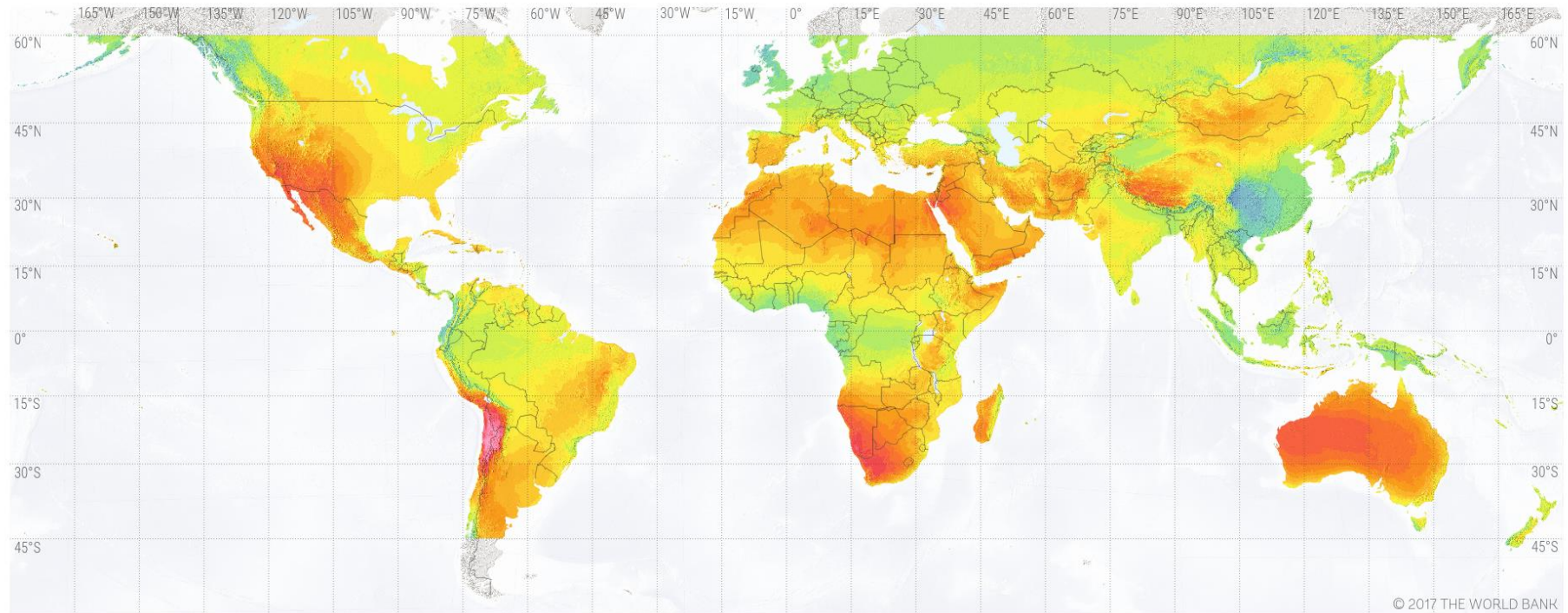
14. Päikesekollektorid sooja tootmiseks – *Intereuro*. http://www.intereuro.ee/paikese_kollektorid-sooja-tootmiseks (31.03.2019).
15. Solar panel orientation – *Energy Education*. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_panel_orientation (01.05.2019).
16. Polycrystalline solar panel 10 W, 12 V – *Velleman*. <https://www.velleman.eu/products/view/?id=438018> (02.05.2019).
17. Roobotiehitamise juhend. Servomootorid – *Digiphysic*. <http://digi.physic.ut.ee/mypages/oppetoo/robotex//vahendid/files/Servomootor.pdf> (03.05.2019).
18. MGR996R. High Torque metal gear dual ball bearing servo – *Electronicoscaldas*. https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf (02.05.2019).
19. Servo mootor 4,8 / 6,8 V 21,5 kg/cm (6,8 V) 180deg – *Oomipood*. Kättesaadav: https://www.oomipood.ee/product/ds3218_servo_mootor_4_8_6_8v_21_5kg_cm_6_8v?q=servo
20. Трекер движения солнца на Ардуино – *Home Made*. Kättesaadav: <https://www.youtube.com/watch?v=d7BLor7V3SM&list=LLyiy2jDJB-zArEtLx7hM1w&index=3&t=562s> (01.05.2019).
21. Mis on Arduino ja kuidas seda kasutada? – *AM*. <https://www.am.ee/node/2193> (02.05.2019).
22. Lubi, S. (2016). Arduino stardikomplekti õppematerjalid. Tartu: Tartu Ülikool. 87 lk.
23. Arduino Mega 2560 – *Arduino Store*. <https://store.arduino.cc/mega-2560-r3> (05.05.2019)
24. Платы расширений, модули, шилды – *Arduino.UA*. https://arduino.ua/cat3-Plati_rasshirenii_Arduino (04.05.2019).
25. Kajak, K. (2017). Andmehõive ja energia kogumise elektroonikasüsteemi arendamine eksperimentaalsele termoelektrilisi elemente rakendavale päikesekollektorile . Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. – 86 lk.
26. Pingejagur – *Robotika Kodulabori võrgustik ja tugikeskkond*. https://home.roboticlab.eu/et/electronics/voltage_divider (04.05.2019).
27. Функции Arduino Void loop() и Void Setup() – *ARDUINOMASTER*. <https://arduinomaster.ru/program/arduino-void-loop-i-void-setup/> (05.05.2019).
28. Vaatlusandmed – *Riigi Ilmateenistus*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/> (22.05.19)

29. Мишуткин, А; Бабанов, И. (2017). Универсальный солнечный трекер для солнечной батареи. Moskva: ГБОУ Гимназия №1515. 18 lk.
30. Kirjeldav statistika – *Tartu Ülikool*. <http://samm.ut.ee/kirjeldav-statistika> (26.05.19)

LISAD

Lisa 1a. Maaailma otsese kiirguse kaart [3]

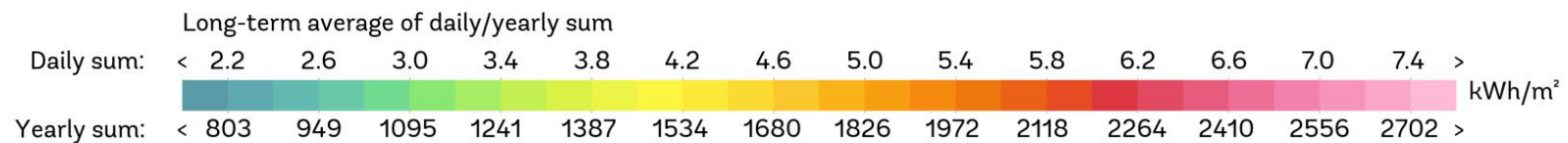
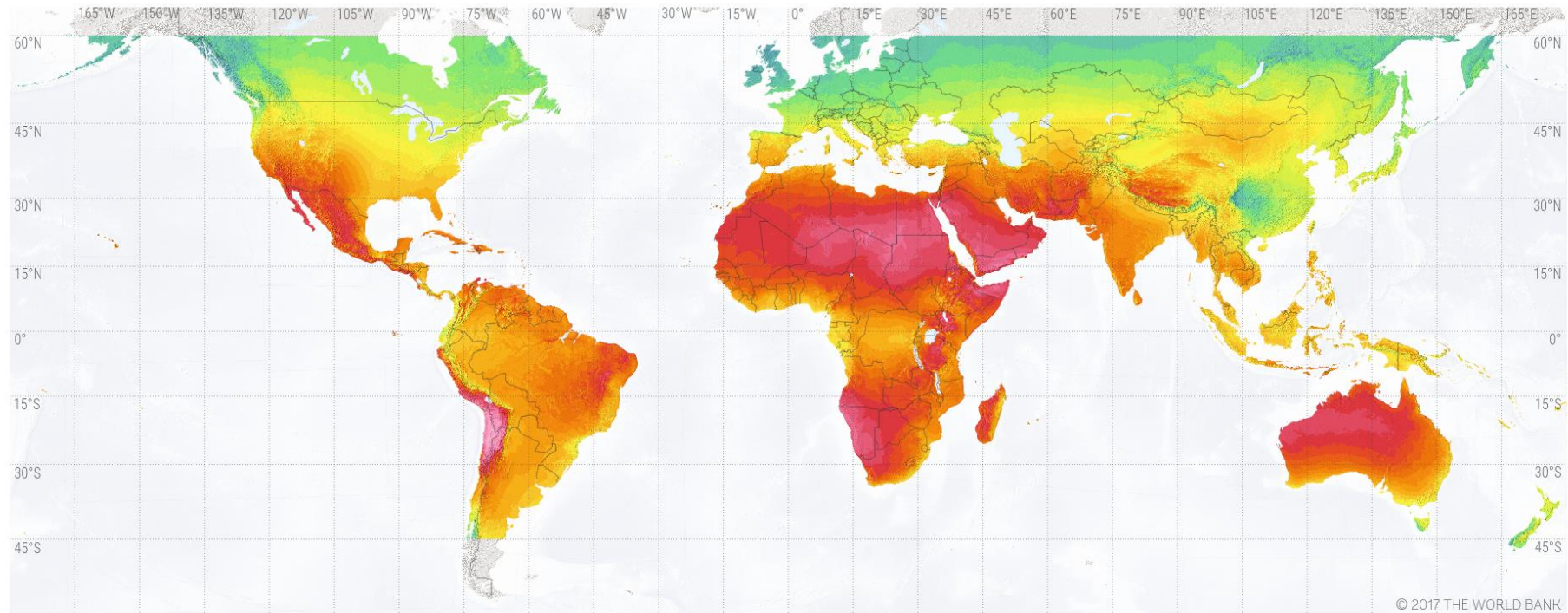
SOLAR RESOURCE MAP DIRECT NORMAL IRRADIATION



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

Lisa 1b. Maaailma summaarse kiirguse kaart [3]

SOLAR RESOURCE MAP GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION

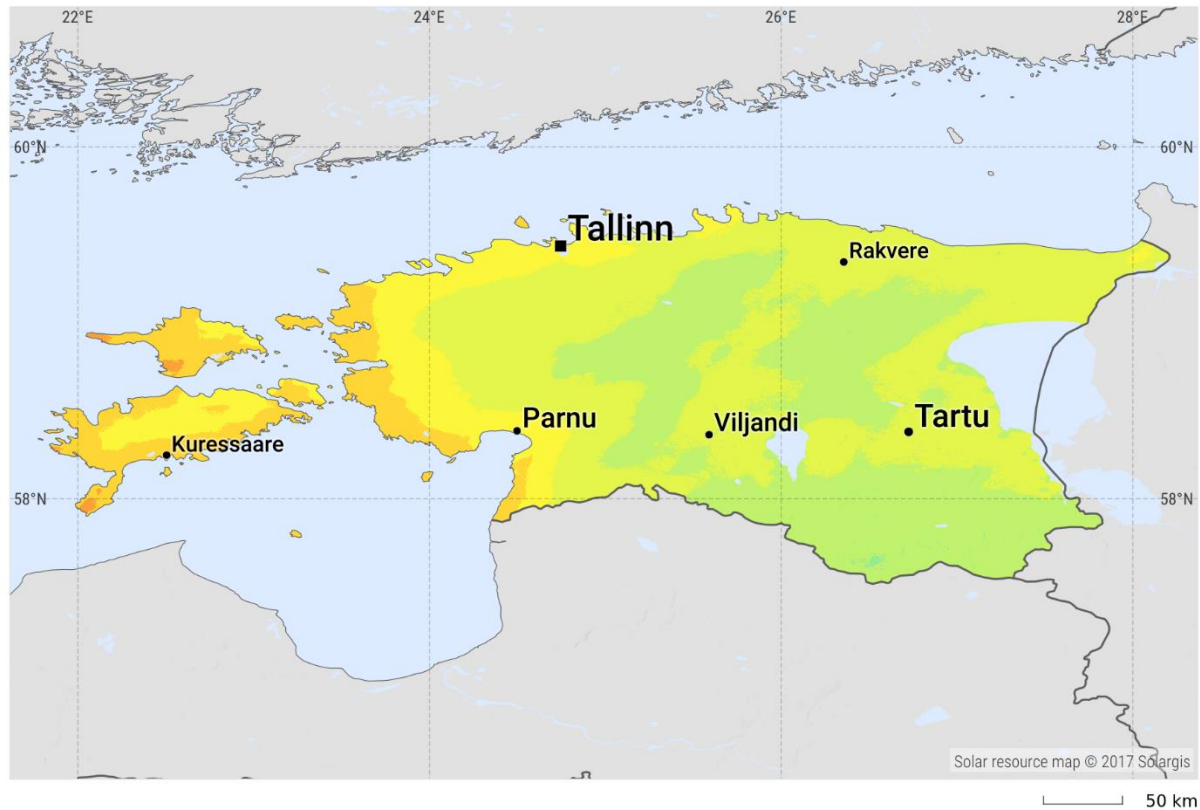


This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

Lisa 2a. Eesti otsese kiirguse kaart [3]

DIRECT NORMAL IRRADIATION ESTONIA

SOLARGIS



Average annual sum of DNI, period 1994-2016

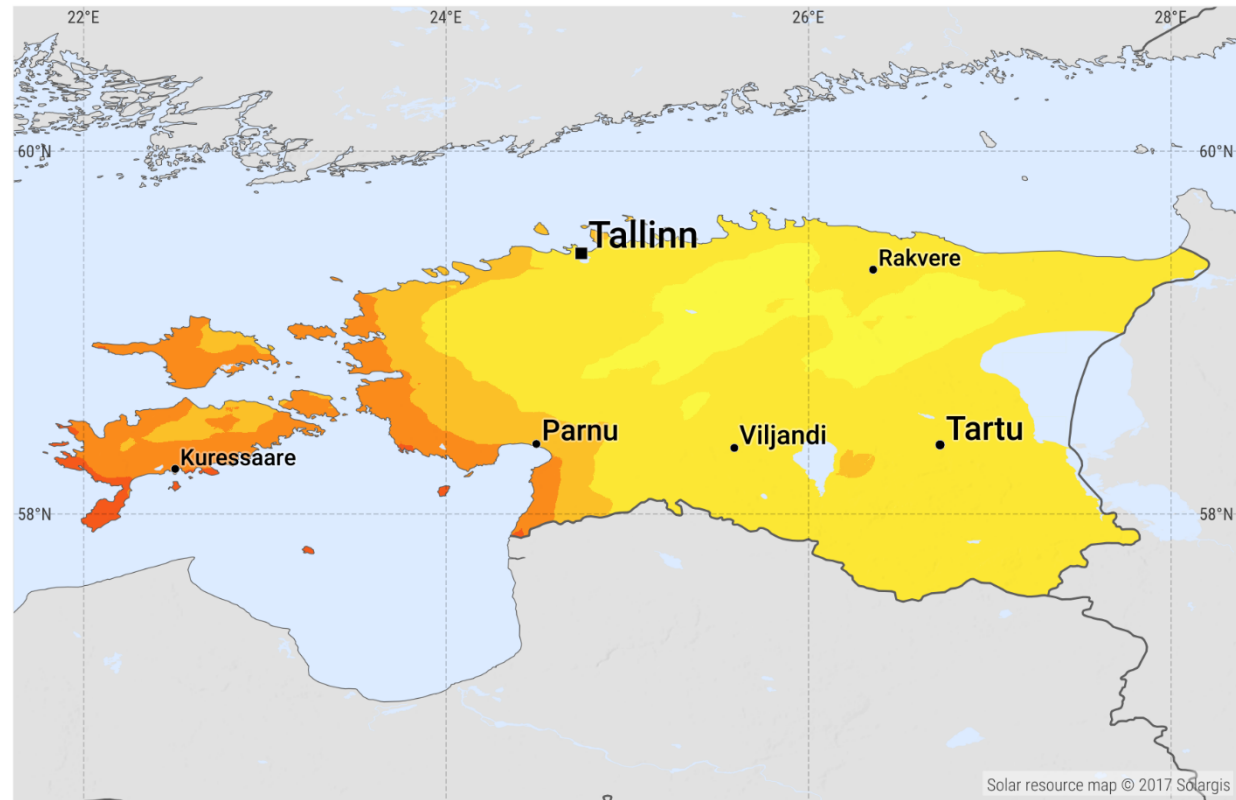


This map is licensed by Solargis under the Creative Commons Attribution license (CC BY-SA 4.0). You are encouraged to use content of the map to benefit yourself and others in creative ways. For more information, please visit <http://solargis.com/download>.

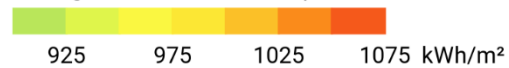
Lisa 2b. Eesti summaarse kiirguse kaart [3]

GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION ESTONIA

SOLARGIS



Average annual sum of GHI, period 1994-2016



This map is licensed by Solargis under the Creative Commons Attribution license (CC BY-SA 4.0). You are encouraged to use content of the map to benefit yourself and others in creative ways. For more information, please visit <http://solargis.com/download>.

Lisa 3. Päikese kiirguse keskmised aastasummad Eestis (Tõravere) [1].

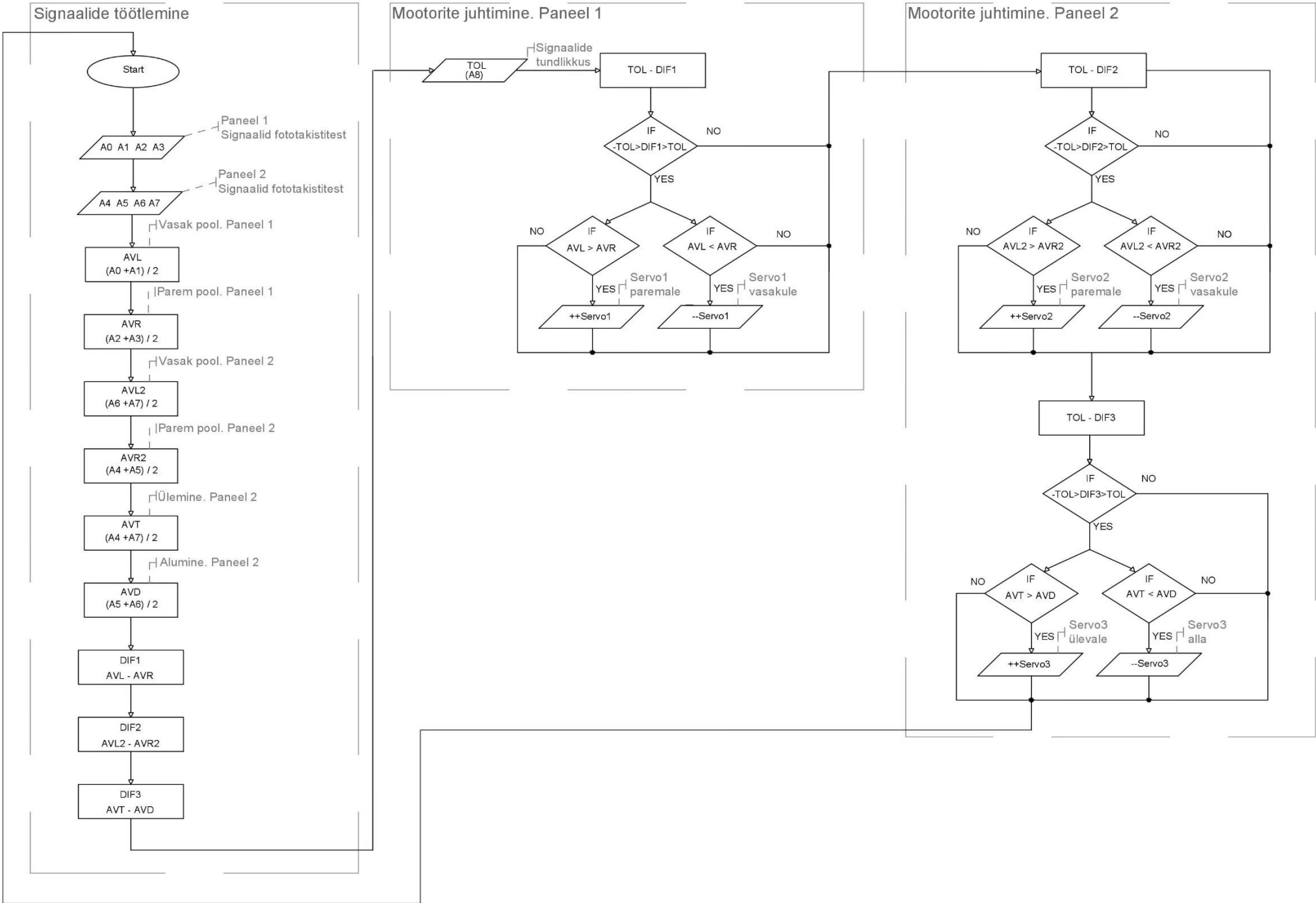
Aasta	Otsene kiirgus S, kW·h/m ²	Hor. pinna otsene kiirgus S ^h , kW·h·m ²	Hajus kiirgus D, kW·h/m ²	Summaarne kiirgus Q, kW·h/m ²
1	2	3	4	5
1955	923,00	450,56	559,39	1010,00
1956	975,22	464,00	560,00	1023,95
1957	831,81	397,81	526,36	924,20
1958	960,00	458,72	509,81	968,56
1959	1209,22	591,39	470,17	1061,58
1960	1012,61	499,39	482,94	982,31
1961	881,28	429,00	487,36	916,39
1962	822,75	390,14	519,08	909,17
1963	1216,03	580,67	535,39	1116,11
1964	1016,97	493,36	550,39	1043,75
1965	971,00	473,14	551,67	1024,86
1966	891,97	433,94	493,58	927,53
1967	925,81	455,61	474,17	929,81
1968	982,92	484,89	498,39	983,33
1969	1183,42	573,67	484,47	1058,08
1970	933,75	464,47	526,00	990,53
1971	1004,31	507,22	505,31	1012,56
1972	993,67	479,28	479,86	959,17
1973	1011,86	486,39	493,69	980,06
1974	919,61	450,61	515,75	966,31
1975	1083,28	521,75	507,11	1028,83
1976	963,47	448,83	531,11	979,95
1977	767,36	365,58	516,42	881,97
1978	902,08	439,69	501,31	940,97
1979	964,03	470,97	516,17	987,17
1980	845,86	401,58	530,58	932,17
1981	802,89	401,58	513,58	911,83
1982	948,81	453,75	508,81	962,56
1983	774,33	394,22	548,19	942,45
1984	822,33	416,22	547,67	963,83
1985	823,75	403,17	515,61	918,75
1986	935,03	450,69	503,44	954,14
1987	835,28	378,58	537,17	915,81
1988	907,53	440,72	543,36	984,03
1989	954,97	468,11	507,81	975,81
1990	908,11	455,17	488,58	943,70

Lisa 3. Järg

1	2	3	4	5
1991	839,36	468,11	518,89	926,70
1992	774,64	413,06	532,53	945,56
1993	836,70	403,22	528,81	926,70
1994	1038,14	505,39	467,36	972,78
1995	1057,67	503,78	484,06	987,78
1996	1088,67	504,19	476,69	980,89
1997	1091,81	530,11	460,89	991,08
1998	952,58	454,75	449,22	903,92
1999	1119,97	558,58	459,33	1017,83
2000	1001,22	482,50	454,47	936,92
Keskmine	929,98	453,23	497,38	949,09

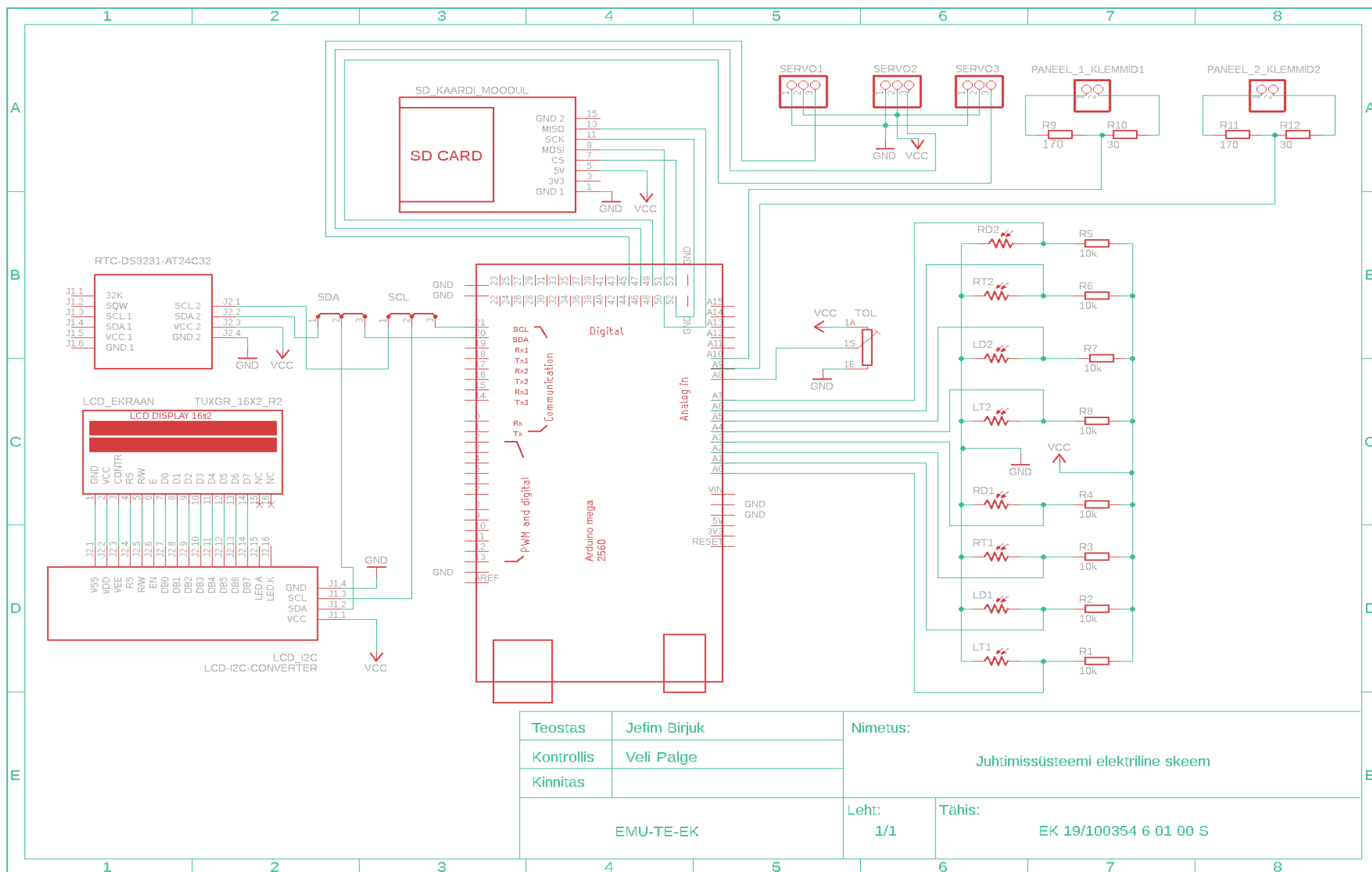
Lisa 4. Päikesepaneel Velleman SOL10P

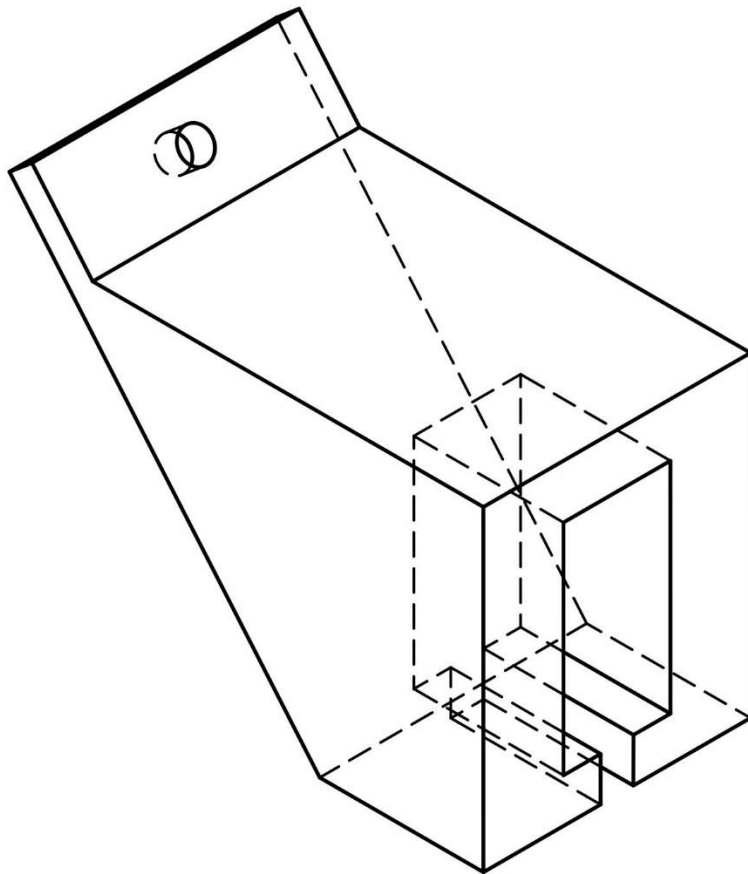
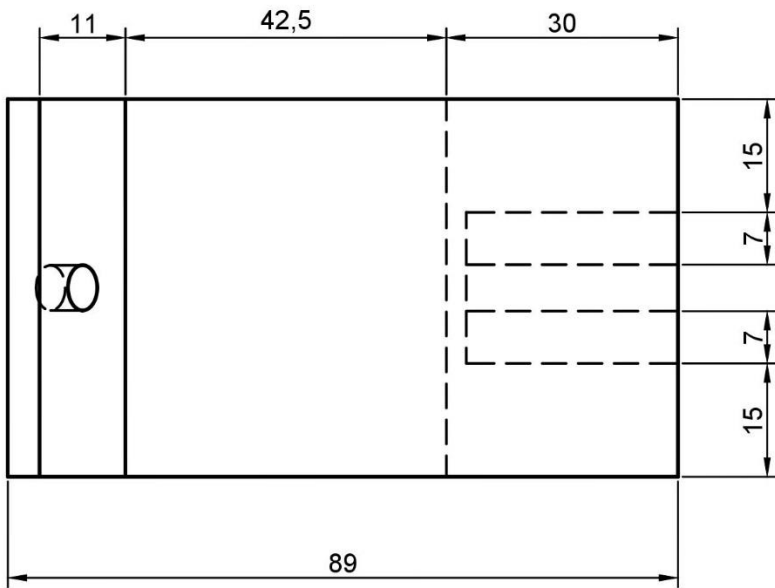
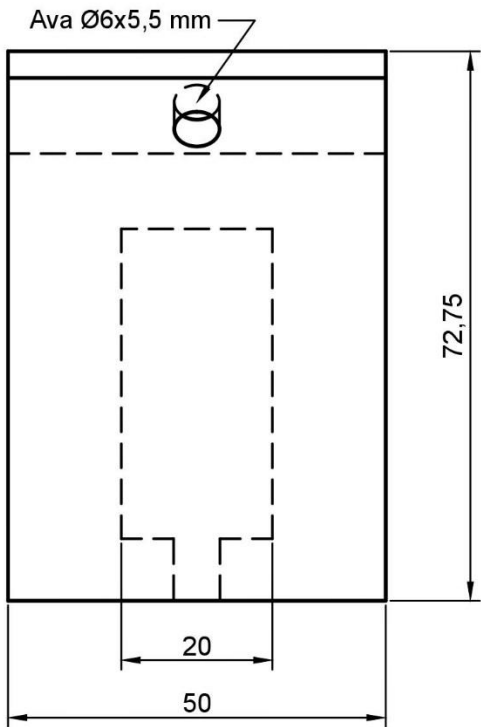
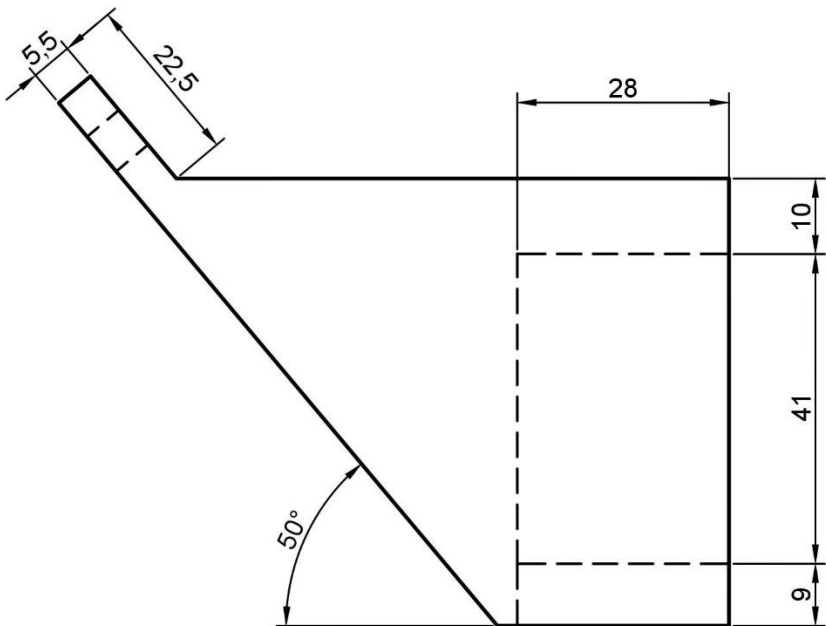




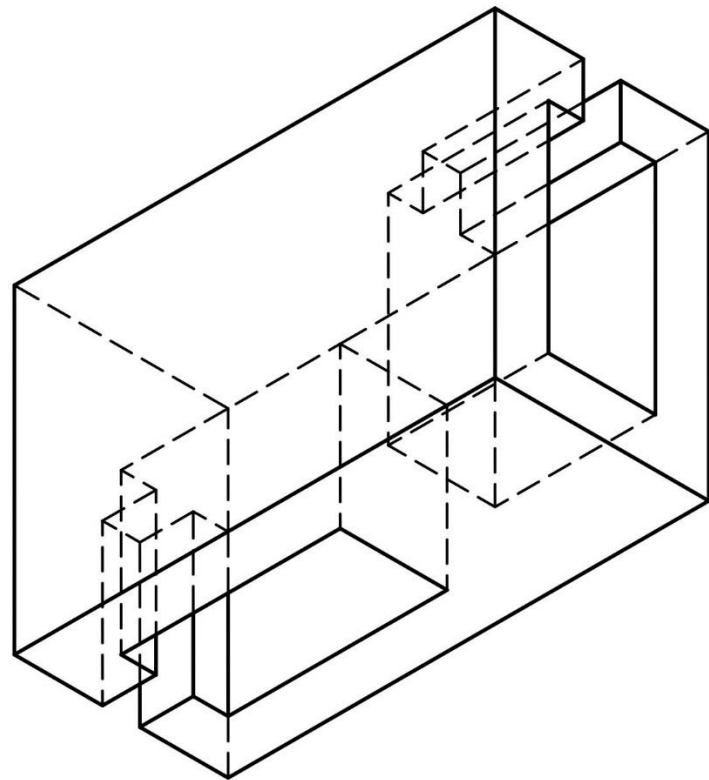
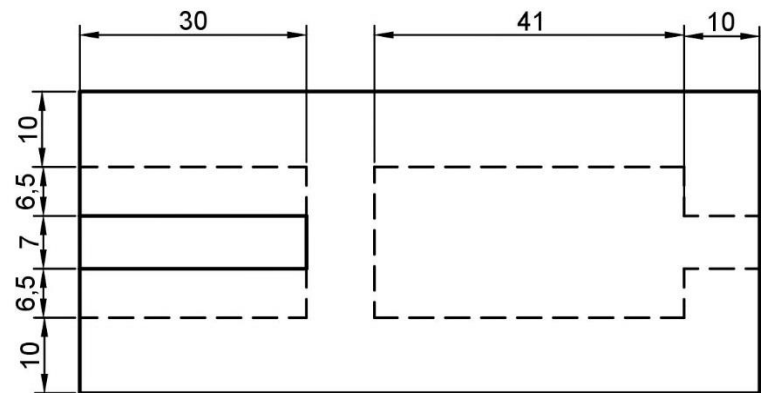
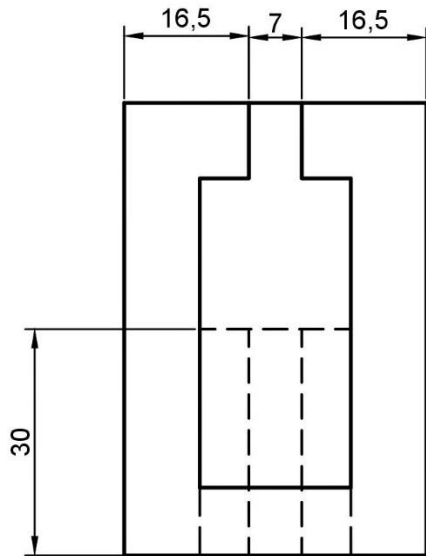
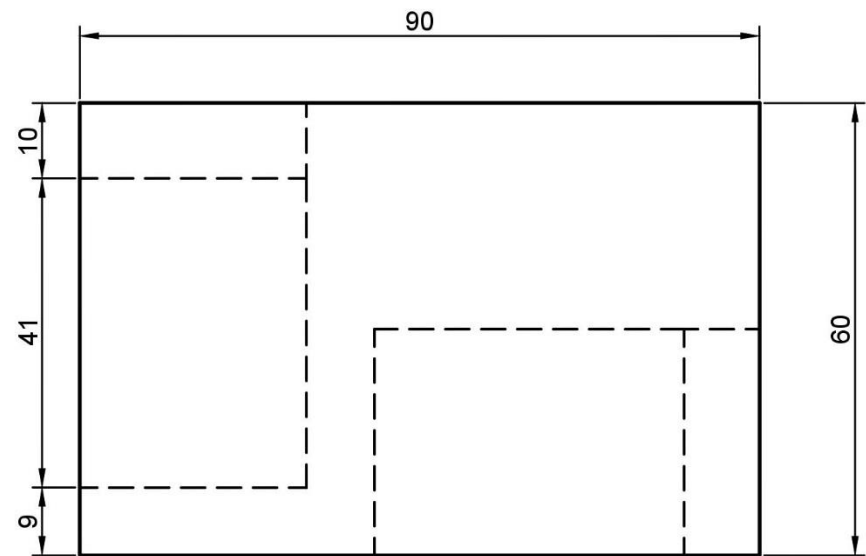
Teostas	Jefim Birjuk	Nimetus Paneelide talitlusalgoritmi plokk skeem		
Kontr.	Veli Palge			
Kinnitas				
EMU-TE-EK		Leht 1/1	Tähis EK 19/100354 5 01 00 S	Mõõt

Lisa 6. Juhtimissüsteemi elektriline skeem





Teostas	Jefim Birjuk	Nimetus Ühe teljega paneeli kinnitus		
Kontr.	Veli Palge			
Kinnitas				
EMU-TE-EK		Leht 1/1	Tähis EK 19/100354 7a 01 00 S	Möödt 1:1



Teostas	Jefim Birjuk	Nimetus Kahe teljega paneeli kinnitus		
Kontr.	Veli Palge			
Kinnitas				
EMU-TE-EK		Leht 1/1	Tähis EK 19/100354 7b 01 00 S	Mõõt 1:1

Lisa 8. Juthimissüsteemi katsestand



Lisa 9. Juhtimissüsteemi programm

// Teekide lisamine

#include <Wire.h> //Teek I2C protokolli jaoks. I2C protokolli kasutab LCD ekraan ning Reaalajamoodul

#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Teek 16x2 LCD ekstraani jaoks

#include <iarduino_RTC.h> //RTC reaalajamooduli teek

#include <Servo.h> //Servomootori teek

#include <SPI.h> //Teek SPI protokolli jaoks. SPI protokollil töötab SD kaardi moodul

#include <SD.h> //SD kaardi mooduli teek

//Alustatakse töö LCD, RTC ja SD-ga

iarduino_RTC time(RTC_DS3231); //Defineeritakse RTC mooduli nimetust

LiquidCrystal_I2C LCD(0x27, 16, 2); //Defineeritakse LCD ekraan. 0x27 - ekranani porti nimetus Arduinos, 16 veergu, 2 rida

File myfile; //Luuakse fail andmete salvestamiseks

//Antakse defineeringud servomootoritele ja määratakse nende algasendid peale programmi käivitamist

Servo servo1; // Defineeritakse Servo1. Üheteljeline paneel

Servo servo2; // Defineeritakse Servo1. Üheteljeline paneel

Servo servo3; // Defineeritakse Servo1. Üheteljeline paneel

int servoh = 60; // Defineeritakse Servo1 algasend

int servoh2 = 100; // Defineeritakse Servo1 algasend

int servov = 140; // Defineeritakse Servo1 algasend

//Analoogsisendite defineerimine

int ld1 = 0; //loeb signaali analoogsisendist 0. Vasak alumine fototakisti. Paneel 1

int lt1 = 1; //loeb signaali analoogsisendist 1. Vasak ülemine fototakisti. Paneel 1

int rd1 = 2; //loeb signaali analoogsisendist 2. Parem alumine fototakisti. Paneel 1

int rt1 = 3; //loeb signaali analoogsisendist 3. Parem ülemine fototakisti. Paneel 1

int ld2 = 7; //loeb signaali analoogsisendist 0. Vasak alumine fototakisti. Paneel 2

```
int lt2 = 6;//loeb signaali analoogsisendist 1. Vasak ülemine fototakisti. Paneel 2
int rd2 = 4;//loeb signaali analoogsisendist 2. Parema alumine fototakisti. Paneel 2
int rt2 = 5;//loeb signaali analoogsisendist 3. Parema ülemine fototakisti. Paneel 2
```

```
void setup() {
```

```
// Määratakse Servode kanalid Arduinol ja Servod pannakse algasenditesse
```

```
servo1.attach(49); // Servo1 pesa Arduino Mega plaadil
servo2.attach(45); // Servo2 pesa Arduino Mega plaadil
servo3.attach(41); // Servo3 pesa Arduino Mega plaadil
servo1.write(servo1); //Servo1 algasend
servo2.write(servo2); //Servo2 algasend
servo3.write(servo3); //Servo3 algasend
```

```
// LCD sisselülitamine
```

```
LCD.begin(); //Alustatakse töö LCD ekraaniga
}
```

```
void loop() {
```

```
//Antakse nimetused fototakistitele ning väärtused korrutatakse vastavalt parandusteguritele
(tabel 3.1)
```

```
int ld=(analogRead(ld1)*1.8);
int lt=((analogRead(lt1)*1.1);
int rd=((analogRead(rd1)*0.9);
int rt=((analogRead(rt1));
int lld=((analogRead(ld2)*1.3);
int llt=((analogRead(lt2)*1.0);
int rrd=((analogRead(rd2)*2.2);
int rrt=((analogRead(rt2)*1.3);
```

```
// Määratakse signaalide tundlikkus
```

```
int tol = 10; //Loeb signaali analoogsisendist 8. Potentsiomeeter tundlikuse määramiseks
```

```
// Defineeritakse analoogsisendid pinge mõõtmiseks
```

```
int pinge2 = analogRead(9); //loeb signaali analoogsisendist 9. Pinge väärtus paneelist 2
```

```
int pinge1 = analogRead(10); //loeb signaali analoogsisendist 10. Pinge väärtus paneelist 1
```

```
//Leitakse keskmised väärtused fototakistitest
```

```
//Üheteljeline paneel
```

```
int avl = (lt+ld); // keskmine väärtus vasakutest anduritest
```

```
int avr = (rd+rt); // keskmine väärtus parematest anduritest
```

```
int dif1 = avl-avr; // arvutatakse erinevus vasakutest ja parematest anduritest
```

```
//Kaheteljeline paneel
```

```
int avl2 = llt+lld; // keskmine väärtus vasakutest anduritest
```

```
int avr2 = rrd+rrt; // keskmine väärtus parematest anduritest
```

```
int avt = llt+rrt; // keskmine väärtus vasakutest anduritest
```

```
int avd = (analogRead(7))+(analogRead(4)); // keskmine väärtus parematest anduritest
```

```
int dif2 = avl2-avr2; // arvutatakse erinevus vasakutest ja parematest anduritest
```

```
int dif3 = avt-avd; // arvutatakse erinevus vasakutest ja parematest anduritest
```

```
//Üheteljelise paneeli juhtimine
```

```
if(-1*tol > dif1 || dif1 > tol2) // Juhul kui tundlikkus on suurem +- märgiga erinevusest...
```

```
{
```

```
    if((avl) > avr) // Kui vasakul poolel on vähem valgust
```

```
        {servoh = ++servoh; // Servo1 muutub asendi paremale ühe sammu võrra
```

```
        if (servoh > 114) // Kui Servo1 saavutab positsiooni 114 (peale seda asendi ta puudutab konstruktsiooni ehk rohkem pöörata ei saa)
```

```
        {
```

```

servoh = 114; // Servo1 rohkem ei liigu
}
}
else if ((avl) < avr) //Kui paremal poolel on vähem valgust
{
servoh = --servoh; // Servo1 muutub asendi vasakule ühe sammu võrra
if (servoh < 10) // Kui Servo1 saavutab positsiooni 10 (peale seda asendi ta puudutab
konstruktsiooni ehk rohkem pöörata ei saa)
{
servoh = 10; // Servo1 rohkem ei liigu
}
}
servo1.write(servoh); // Antakse signaal Servo1- le
}

```

//Kaheteljelise paneeli juhtimine

```

if(-1*tol > dif2 || dif2 > tol) // Juhul kui tundlikkus on suurem +- märgiga erinevusest...
{
if ((avl2) > avr2) // Kui vasakul poolel on vähem valgust
{servoh2 = --servoh2; // Servo1 muutub asendi paremale ühe sammu võrra
if (servoh2 < 40) // Kui Servo1 saavutab positsiooni 114 (peale seda asendi ta puudutab
konstruktsiooni ehk rohkem pöörata ei saa)
{
servoh2 = 40; // Servo1 rohkem ei liigu
}
}
else if ((avl2) < avr2) //Kui paremal poolel on vähem valgust
{
servoh2 = ++servoh2; // Servo1 muutub asendi vasakule ühe sammu võrra
if (servoh2 > 180) // Kui Servo1 saavutab positsiooni 10 (peale seda asendi ta puudutab
konstruktsiooni ehk rohkem pöörata ei saa)
{
servoh2 = 180; // Servo1 rohkem ei liigu
}
}
}

```

```

    }
}
servo2.write(servoh2); // Antakse signaal Servo1- le
}
if(-1*tol > dif3 || dif3 > tol) // Juhul kui tundlikkus on suurem +- märgiga erinevusest...
{
    if (avt > (avd))// Kui vasakul poolel on vähem valgust
    {servov = --servov; // Servo1 muutub asendi paremale ühe sammu võrra
    if (servov < 140) // Kui Servo1 saavutab positsiooni 114 (peale seda asendi ta puudutab
konstruktsiooni ehk rohkem pöörata ei saa)
    {
        servov = 140; // Servo1 rohkem ei liigu
    }
}
else if (avt < (avd)) //Kui paremal poolel on vähem valgust
{
    servov= ++servov; // Servo1 muutub asendi vasakule ühe sammu võrra
    if (servov > 180) // Kui Servo1 saavutab positsiooni 10 (peale seda asendi ta puudutab
konstruktsiooni ehk rohkem pöörata ei saa)
    {
        servov = 180; // Servo1 rohkem ei liigu
    }
}
servo3.write(servov); // Antakse signaal Servo1- le
}

// Signaalid paneelidest teisendatakse pingeväärtuseks
float voltage1 = 6.66*5*pinge1/1023;//Pinge paneelist 1. Korrutame signaali vastavalt
pingejaguri koefitsiendile
float voltage2 = 6.66*5*pinge2/1023;//Pinge paneelist 2. Korrutame signaali vastavalt
pingejaguri koefitsiendile

//Kuvatakse LCD ekraani peal vajalikud parameetrid

```

```

LCD.begin(); //Alustatakse töö LCD ekraaniga
LCD.clear(); // Värskendatakse LCD ekraan
LCD.print(voltage1); //kuvab monitoril pingeväärtus paneelist 1
LCD.print(" V"); //paneel mõõdühikut juurde
LCD.setCursor(10,0); // Defineeritakse järgmise parameetri asend LCD ekraanil
LCD.print(voltage2); //kuvab monitoril pingeväärtus paneelist 2
LCD.print(" V"); //paneel mõõdühikut juurde
LCD.setCursor(0,1); // Defineeritakse järgmise parameetri asend LCD ekraanil
LCD.print(time.getTime("d-m, H:i:s")); //Kuvatakse LCD ekraanil reaalaeg formaadis d-m,
H:i

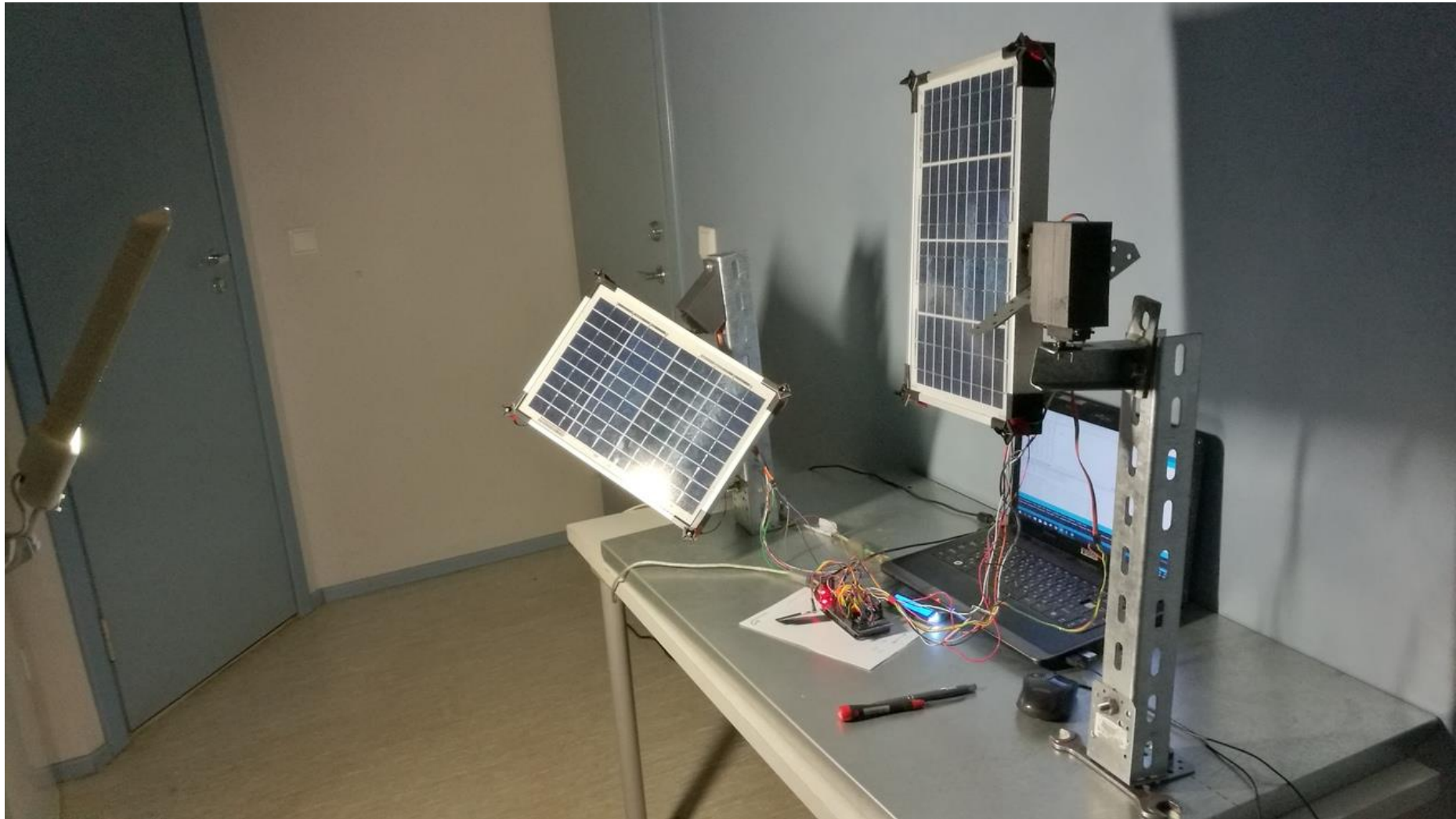
// Andmete salvestamine SD-kaardile

SD.begin(53); // Alustatakse töö SD kaardi mooduliga. 53 on CS juhe pesa Arduino Mega-
1
myfile = SD.open("Katse19.05.txt", FILE_WRITE); // Avatakse fail ning määratakse selle
nimetus
myfile.print(time.getTime("d-m H:i:s")); // Failis fikseeritakse reaalaeg
myfile.print(" "); // pannakse koma arameetrite vahel
myfile.print(voltage1); // Salvestatakse pingeväärtus paneelist 1 vastavalt reaalaajale
myfile.print(" "); // pannakse koma arameetrite vahel
myfile.println(voltage2); // Salvestatakse pingeväärtus paneelist 2 vastavalt reaalaajale
myfile.close(); // Fail pannakse kinni

delay(1000); //Viivitus programmi tsüklilise etapide vahel
}

```

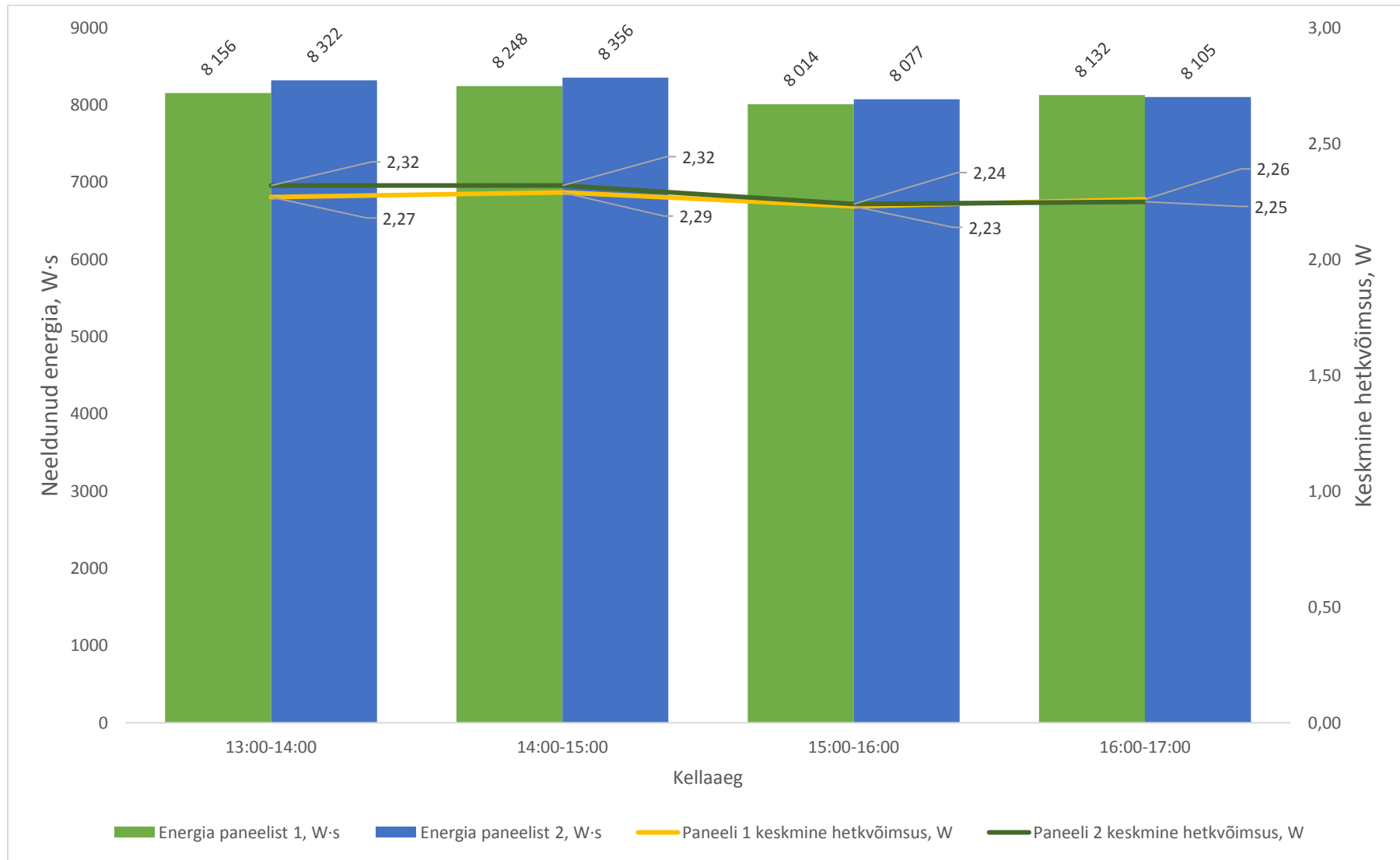
Lisa 10. Esmase katse vaade



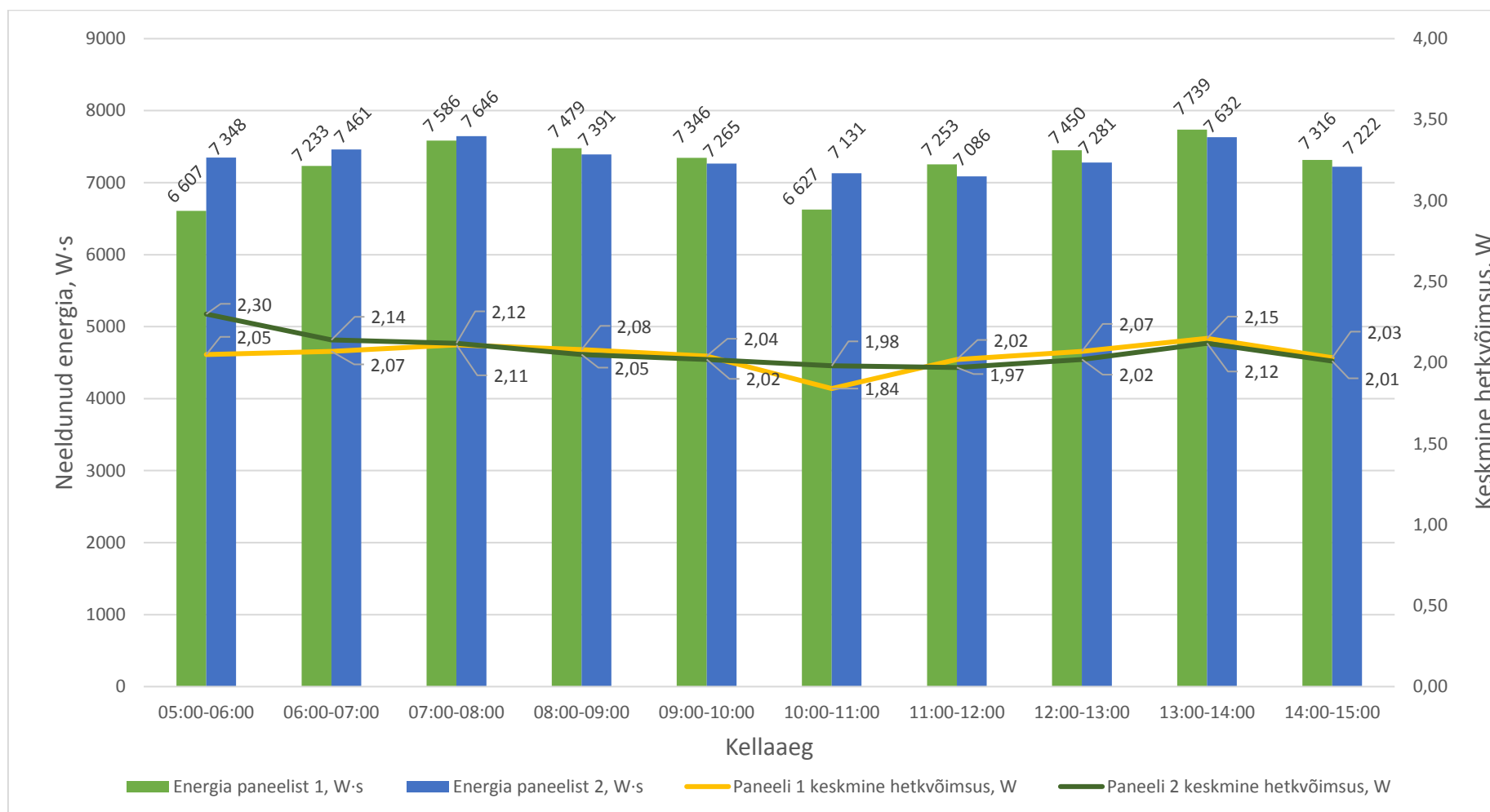
Lisa 11. Fototakistite katseandmed

Aeg			LT1	LD1	RT1	RD1	LT2	LD2	RT2	RD2
23	52	13	288	474	599	538	317	233	568	343
23	52	19	245	419	518	468	348	262	551	351
23	52	25	244	417	507	447	298	221	493	288
23	52	31	283	469	606	560	332	252	500	310
23	52	37	253	432	550	515	305	224	536	314
23	52	43	291	474	584	507	316	239	471	284
23	52	50	319	485	589	524	334	247	596	372
23	52	56	293	482	568	491	306	230	460	273
23	53	2	247	426	496	431	336	249	598	375
23	53	8	290	483	599	550	302	227	460	272
23	53	14	284	437	521	478	351	263	586	376
23	53	20	291	479	558	477	294	219	468	273
23	53	27	246	416	518	453	340	258	524	327
23	53	33	292	473	595	516	322	244	481	292
23	53	39	293	474	599	523	325	239	584	357
23	53	45	262	441	582	549	315	238	471	283
23	53	51	259	431	516	430	332	245	594	368
23	53	57	285	463	564	475	311	235	465	278
23	54	4	248	419	513	439	325	239	584	356
23	54	10	295	477	606	535	326	247	489	298
23	54	16	294	477	607	553	297	220	491	285
23	54	22	295	477	603	543	350	262	571	368
23	54	28	252	425	532	491	307	231	462	275
23	54	34	252	423	504	434	302	222	522	303
23	54	41	275	450	541	450	348	263	554	351
23	54	47	251	417	527	442	302	226	460	268
Keskmine			274	452	558	493	321	240	521	317
Parandustegur			1,8	1,1	0,9	1,0	1,3	1,0	2,2	1,3

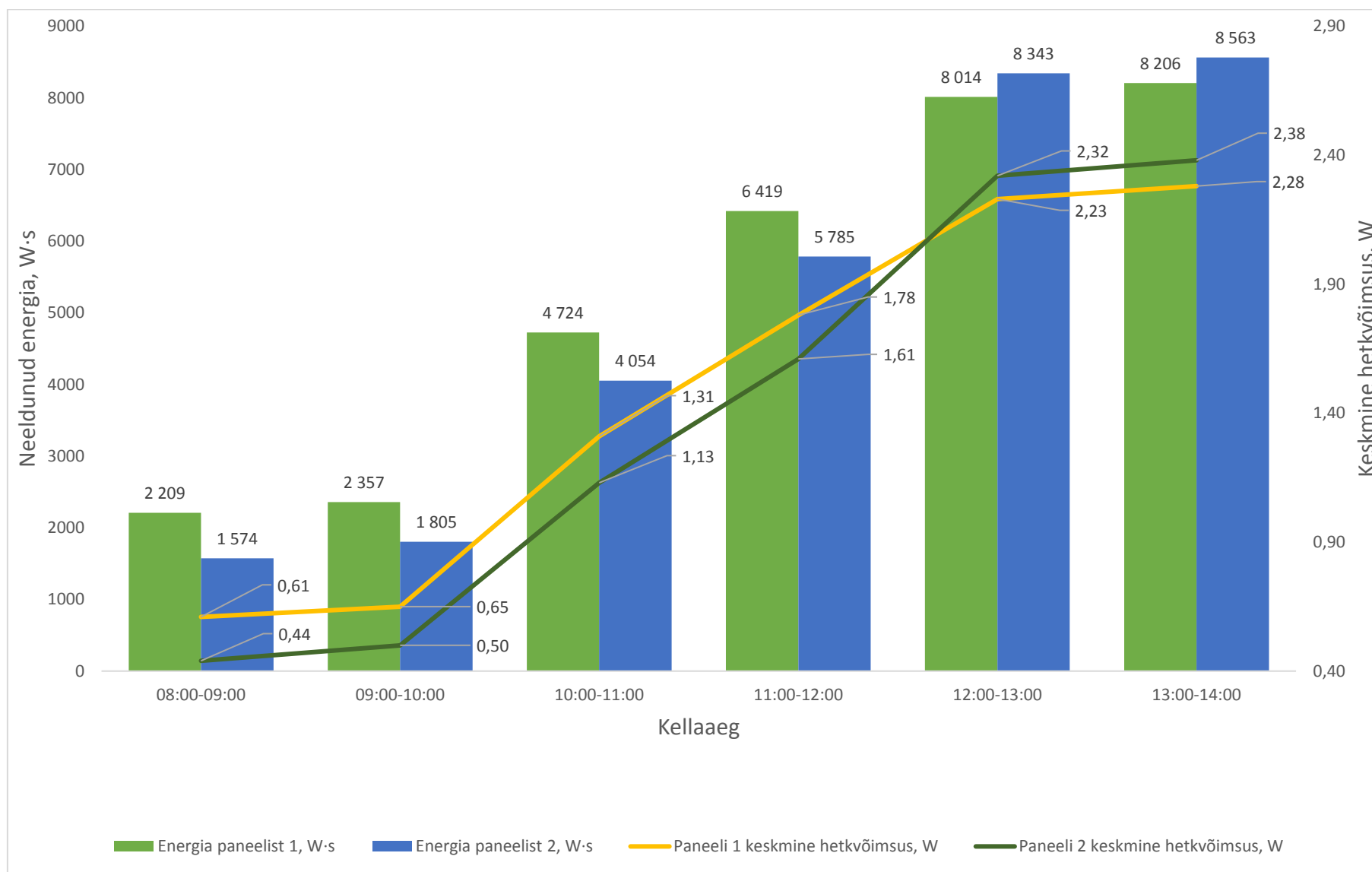
Lisa 12. Katse 1 tulemused



Lisa 13. Katse 2 tulemused



Lisa 14. Katse 3 tulemused



Lisa 15. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, _____,
(*autori nimi*)

sünniaeg _____,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

_____,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on _____,
(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(*allkiri*)

Tartu, _____
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)

